

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Barbora Svobodová

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Spektrofotometrie v neonatologické fototerapii

Spectrophotometry in Neonatal Phototherapy

2015

Barbora Svobodová

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Barbora Svobodová**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901T009 Biomedicínské inženýrství
Téma: **Spektrofotometrie v neonatologické fototerapii**
Spectrophotometry in Neonatal Phototherapy

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická analýza neonatologické fototerapie, využívané zdroje záření a metody jejich validace.
2. Koncepční návrh spektrofotometrického přístroje.
3. Konstrukce prototypu spektrofotometrického přístroje.
4. Vývoj ovládacího software pro spektrofotometr.
5. Sestavení experimentálního měřicího pracoviště.
6. Testování měřicího přístroje.
7. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VÍTEK, Libor. *Bilirubin a interní choroby*. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-2351-8.
[2] ŠAJTER, Vít, et al. *Elektroterapie a fototerapie*. Martin: Osveta, 2005. ISBN 8080631719.
[3] NAVRÁTIL, Leoš.(ed) *Moderní fototerapie a laseroterapie*. Praha: Magnus, 2000. 227 s. ISBN 80-902318-3-7.
[4] PECHOUŠEK, J. *Základy programování v prostředí LabVIEW*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. 84 s. ISBN 80-244-0800-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Penhaker, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

Datum odevzdání diplomové práce: 7. 5. 2015



.....

Barbora Svobodová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Markovi Penhakerovi, Ph. D. za rady při vypracovávání této diplomové práce, a kolektivu firmy EPEM za konzultace, ochotu a velmi cenné rady při řešení zadané problematiky. Další obrovské díky patří rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je sestavení spektrofotometrického přístroje, a hlavně vytvoření jeho ovládacího a výpočetního software. Přístroj je primárně určen k proměřování fototerapeutických zářičů používaných na neonatologických odděleních. Na základě změřeného spektra (tj. závislosti intenzity záření na vlnové délce) a dalších vstupních parametrů jsou programem dopočteny spektrometrické, radiometrické, fotometrické a kolorimetrické veličiny.

Klíčová slova

Světlo, kolorimetrie, radiometrie, fotometrie, spektrofotometr, neonatologie, hyperbilirubinemie, fototerapie.

Abstract

The topic of this thesis is to assemble the spectrophotometric instrument and especially to create the control and calculation software. This device is primarily intended for measuring phototherapy sources used in neonatal wards. On the basis of the measured spectrum (ie. depending of the radiation intensity on the wavelength) and other input parameters are calculated spectrometric, radiometric, photometric and colorimetric values by the program.

Key words

Light, colorimetry, radiometry, photometry, spectrophotometer, neonatology, hyperbilirubinemia, phototherapy.

Obsah

1 Úvod	9
2 Neonatologická fototerapie.....	10
2.1 Novorozenecká hyperbilirubinemie	10
2.2 Terapie hyperbilirubinemie	11
2.2.1 Fototerapie	11
2.2.2 Exsangvinační transfúze	12
2.2.3 Další možnosti léčby novorozenecké hyperbilirubinemie	12
2.3 Využívané zdroje záření a metody jejich validace	13
3 Návrh spektrofotometrického přístroje	18
4 Konstrukce prototypu.....	20
5 Software	21
5.1 Převod posloupnosti pixelů na vlnové délky [nm]	21
5.2 Kalibrace spektrometru	22
5.2.1 Převod amplitudy spektrálních čar [AD Counts] na ozáření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$].....	23
5.3 Spektrometrie	24
5.4 Kolorimetrie	24
5.4.1 Barva.....	24
5.4.2 Standardní zdroje světla.....	27
5.4.3 Barevné vidění – definice standardního pozorovatele	27
5.4.4 CIE 1931 barevný prostor XYZ.....	28
5.4.5 RGB	35
5.4.6 CIE 1960 barevný prostor UCS	36
5.4.7 CIE 1976 barevný prostor L^* , u^* , v^* (LUV)	37
5.4.8 CIE 1976 barevný prostor L^* , a^* , b^* (Lab).....	38
5.4.9 Jiné charakteristiky barev	41
5.5 Radiometrie	42
5.5.1 Související pojmy	42
5.5.2 Radiometrické veličiny	42
5.6 Fotometrie	46
5.7 Uživatelské rozhraní softwaru.....	49

6	Sestavení experimentálního měřicího pracoviště	52
7	Testování měřicího přístroje	53
8	Zhodnocení dosažených výsledků	55
9	Závěr	58
10	Literatura.....	60
11	Seznam příloh.....	64

1 Úvod

Fototerapie je léčebnou metodou založenou na pozitivních účincích neionizujícího elektromagnetického záření dopadajícího na povrch lidského těla. Nejvíce se uplatňuje v dermatologii, ale své nezastupitelné místo má rovněž na neonatologických odděleních.

Neonatologická fototerapie využívá záření pásma viditelného, s vlnovými délkami zejména okolo 450 nm, a to k degradaci nekonjugovaného bilirubinu na lumirubiny. Ty jsou z těla vylučovány spolu s tělními tekutinami. Bilirubin jako takový je totiž příčinou vzniku novorozenecké žloutenky (hyperbilirubinémie). Ta může u nedonošených novorozenců vést až k poškození mozku, protože jejich hematoencefalická bariéra, zajišťující ochranu mozku, ještě není plně vyvinuta. Z tohoto důvodu je pro ně žloutenka extrémně nebezpečná.

Zdroji záření jsou ve fototerapii nejčastěji stojanové lampy umístěované nad inkubátory nebo vyhřívané podložky. Světlo samotné pak emitují zářivky, wolframové halogenové žárovky, halogenidové výbojky nebo zářiče složené z LED.

Vzhledem k tomu, že jsou tato zařízení využívána právě na neonatologických odděleních, kde je potřeba obzvláště pečlivě dbát na dodržení bezpečnostních mezí a dávky záření, je nezbytně nutné je pravidelně validovat. V klinické praxi se k proměřování obvykle využívají ruční spektrometry s rozsahem měřených vlnových délek zhruba od 450 do 470 nm, které jsou tudíž schopny měřit pouze modré světlo. Ne všechny zdroje ovšem emitují takto úzké spektrum, kromě těch na bázi LED. Mnohem vhodnější je proto použití univerzálního širokospektrálního kapesního měřiče – spektrofotometru.

Cílem této diplomové práce je sestavení takovéhoho přístroje a naprogramování ovládacího a výpočetního software v prostřední LabVIEW, který na základě změřeného spektra (tj. závislosti intenzity záření na vlnové délce) a dalších vstupních parametrů dopočte požadované spektrometrické, radiometrické, fotometrické a kolorimetrické veličiny.

2 Neonatologická fototerapie

Fototerapie – tj. léčba, využívající pozitivních účinků elektromagnetického záření na lidský organismus, se v neonatologii využívá k terapii onemocnění zvaného hyperbilirubinemie, tedy novorozenecké žloutenky.

2.1 Novorozenecká hyperbilirubinemie

Hyperbilirubinemie je stav, kdy dojde k dočasné dysbalanci mezi tvorbou a vylučováním bilirubinu, a jeho koncentrace v krvi překročí hranici 25 $\mu\text{mol/l}$.

Bilirubin je konečným produktem metabolismu krevního barviva hemoglobinu, který se uvolňuje při rozpadu červených krvinek (erytrocytů) ve slezině, játrech a kostní dřeni, kde jsou fagocytovány. Nejprve je v nekonjugovaném stavu, kdy má toxické účinky na nervové buňky, a může způsobit přechodné i trvalé poškození centrální nervové soustavy - ukládá se v soustavách okolo mozkového kmene, tj. v šedé substanci, a vzniká tak bilirubinová encefalopatie, jinak řečeno jádrový ikterus (kernicterus). U dospělých jedinců a donošených dětí je mozek vůči bilirubinu chráněn hematoencefalickou bariérou, ta ale u nedonošených novorozenců ještě není plně dovyvinuta. Proto je pro ně žloutenka tak nebezpečná. V normálních případech dále nekonjugovaný bilirubin putuje do jater navázaný na albumin plazmy. V játrech se transformuje na tzv. konjugovanou formu, rozpustou ve vodě, takže se může vyloučit potem, močí a stolicí (jako součást žluči).

V prenatálním období plod bilirubin nemetabolizuje, je odstraňován placentou. Po porodu jsou spuštěny všechny mechanismy k jeho eliminaci, ovšem jejich funkčnost ještě není dokonalá. Navíc je proces odbourávání zhoršen, vyskytují-li se určité rizikové faktory, které vytěsňují nekonjugovaný bilirubin z vazeb na albumin a zvyšují tak jeho volný výskyt. Denní produkce bilirubinu u novorozence je dvakrát vyšší než u dospělých jedinců, protože život fetálních erytrocytů je kratší (90 oproti 120 dnům) a množství hemoglobinu je vyšší.

Klinicky se projevuje žloutenkou (ikterem), žlutým zbarvením očního bělma, kůže a sliznic. U novorozenců je ikterus klinicky znatelný až po překročení koncentrace 85 $\mu\text{mol/l}$. Postihuje 50 % donošených a 80 % nedonošených jedinců. Pro donošené novorozence představuje nebezpečí překročení hladiny 450 $\mu\text{mol/l}$, protože tehdy hrozí vznik bilirubinové encefalopatie.

Hyperbilirubinemie může být fyziologická (icterus neonatorum) i patologická, kdy jde o projev vážného onemocnění s možným poškozením důležitých orgánů.

Fyziologickou formu nejčastěji způsobuje polycytemie – zvýšený počet erytrocytů v krvi v brzkém postnatálním období. Objevuje se po 24 hodinách života a mizí do konce prvního týdne. Hladina celkového bilirubinu nepřesahuje 205 $\mu\text{mol/l}$, konjugovaného 35 $\mu\text{mol/l}$. Vyskytuje se u zdravých jedinců a léčba není nutná, ovšem u předčasně narozených dětí je tomu jinak. Onemocnění přetrvává po dobu až tří týdnů, a je způsobeno hypoalbuminemií, díky které je snížen počet vazebních míst pro bilirubin. Léčba je nutná.

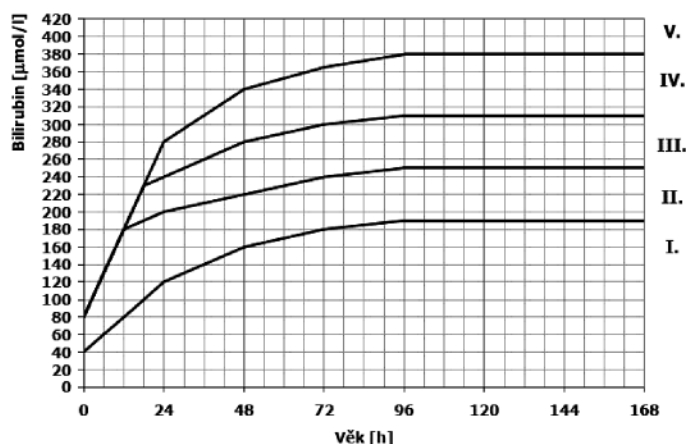
Patologická hyperbilirubinemie se objevuje do 24 hodin po porodu. Celková hladina bilirubinu je u donošených novorozenců vyšší než 265 $\mu\text{mol/l}$, konjugovaný bilirubin přesahuje 35 $\mu\text{mol/l}$.

Žloutenka trvá minimálně 10 dní, u nedonošených dětí až tři týdny. Může vznikat například po porodním traumatu (modřiny, kefalohematom po porodu kleštěmi), při poruše vazby bilirubinu na albumin nebo při inkompatibilitě v Rh a AB0 systému mezi matkou a plodem. Pokud je matka Rh negativní a dítě Rh pozitivní, začne imunitní systém matky vytvářet protilátky a plod napadat. První dítě nebývá postiženo, ale hrozba nastává při dalších těhotenstvích, takže je nezbytně nutné po prvním porodu matce do 72 hodin podat látku anti-D IgG, která sníží hladinu protilátek pro další možnou graviditu. V případě AB0 systému nastává problém, pokud má matka krevní skupinu 0 a plod A nebo B. Intenzita ikteru je ovšem menší než při inkompatibilitě Rh.

[1], [2], [3]

2.2 Terapie hyperbilirubinemie

K určení léčebného postupu při hyperbilirubinemii se používá Hodrův - Poláčkův indikační graf, který novorozence zařadí do jedné z pěti skupin na základě hladiny celkového bilirubinu a věku. Pro každou skupinu je specifikována určitá terapie. Nejčastěji se indikuje fototerapie, v těžších případech výměnná (exsangvinační) transfúze.



Obrázek 1: Hodrův - Poláčkův indikační graf [4]

2.2.1 Fototerapie

Fototerapie způsobuje izomerizaci bilirubinu – pohlcením energie fotonů vznikají strukturní izomery (lumirubiny) rozpustné ve vodě, které jsou poté vylučovány spolu s tělními tekutinami. Nejúčinnější je během prvních 48 hodin od rozpuštění žloutenky, pokles bilirubinu by měl být znatelný již po 4 až 6 hodinách, a to zhruba o 34 $\mu\text{mol/l}$ v séru. Účinnost je závislá na spektrálních vlastnostech použitého záření (rozsahu vlnových délek a peaku), intenzitě, době ozařování, na zdroji záření a vzdálenosti mezi ním a tělním povrchem, velikosti ozařované plochy (BSA – Body Surface Area) a samozřejmě na počáteční koncentraci bilirubinu.

Za nejefektivnější je ve fototerapii považováno modré světlo s peakem okolo 460 ± 30 nm, popř. záření s rozsahem vlnových délek od 400 do 500 nm, s intenzitou (spektrální ozářeností) okolo $30 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$, maximálně však $65 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$, dopadající na co největší BSA.

Dávka záření je dána intenzitou záření, dobou expozice a ozařovanou plochou.

Zdroji záření jsou nejčastěji lampy umístěné na stojanu. Mohu být ovšem použita i optická vlákna vedoucí studené světlo od zdroje do podložky umístěné pod kojencem. Obě tyto metody lze kombinovat.

Dítě je při fototerapii nahé, chráněny jsou pouze oči brýlemi, genitálie plenkou a hlava čepicí. Aby se zabránilo podchlazení, je kojenec uložen v inkubátoru nebo na vyhřívané podložce. Během léčby sestra kontroluje bilanci tekutin, srdeční činnost, dýchání, tělesnou teplotu, prokrvení, polohu a celkové chování. Veškeré údaje jsou dokumentovány.

Mezi případné nežádoucí účinky patří nebezpečí poškození oční sítnice, zvýšená ztráta tekutin, hrozba přehřátí nebo naopak podchlazení, riziko úrazu elektrickým proudem, nebezpečí přehlédnutí cyanózy (ozařujeme modrým světlem), kožní reakce a rovněž nelze opomíjet psychologické aspekty – ztráta volného kontaktu mezi matkou a dítětem.

2.2.2 Exsangvinační transfúze

Jedná se o eliminační metodu, s cílem odstranit z krve přebytečný bilirubin (aby klesl o 60 až 75 %) i samotné nadbytečné erytrocyty. Indikací k transfuzi je závažná forma hemolytického onemocnění novorozence, kterou již nelze řešit jinak. Může být provedena dvěma způsoby. Buďto je krev odebrána a následně podána zpět (po zavedení sterilní pupečnickové cévky je odebráno 5 až 20 ml krve a stejné množství se pak vrátí, celý proces se opakuje několikrát) nebo jde o kontinuální metodu (z jednoho katétru se krev odebírá a současně se stejné množství do oběhu vrací druhým žilním katétrelem). Výkon se provádí za přísných aseptických podmínek nebo na operačním sále.

2.2.3 Další možnosti léčby novorozenecké hyperbilirubinemie

Medikamenty je možné aplikovat albumin, na který se nekonjugovaný bilirubin naváže a je transportován do jater, kde se přemění v konjugovanou vylučitelnou formu. Tuto přeměnu lze rovněž stimulovat podáním Phenobarbitalu. Další variantou je podání látky Carbosorb snižující zpětnou resorpci bilirubinu ve střevech.

[1], [2], [3], [34], [35]

2.3 Využívané zdroje záření a metody jejich validace

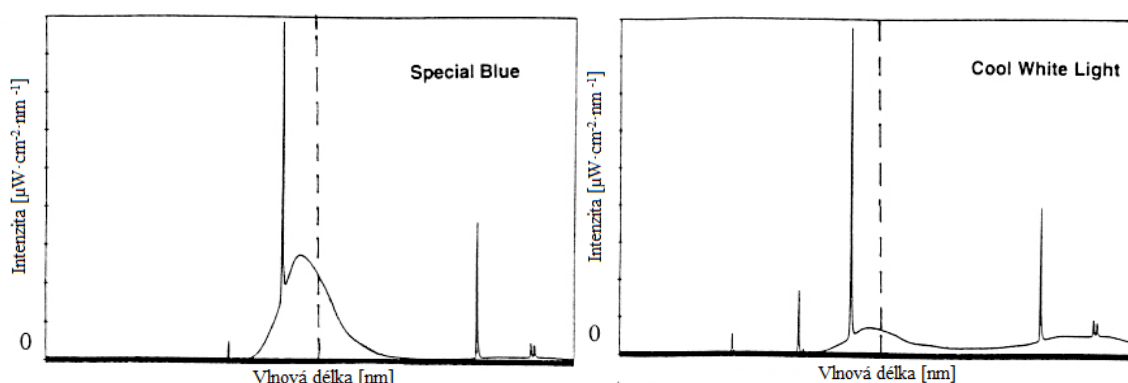
Mezi využívané **zdroje záření** patří:

- **Zářivka** (modrá, tyrkysová - modrozelená, zelená, bílá)

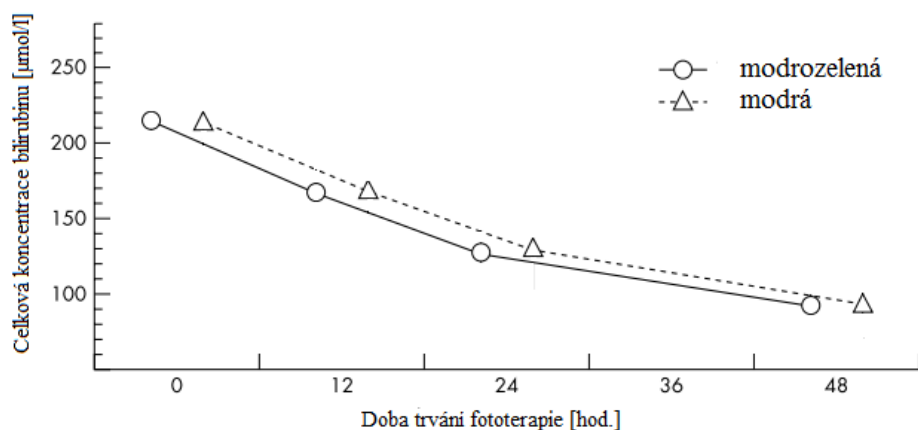
Jedná se o nízkotlaké rtuťové výbojky tvořené skleněnou trubicí se žhavicími elektrodami, naplněné rtuťovými parami a argonem. Když nastane výboj, je produkováno ultrafialové záření. To dopadá na stěny trubice pokryté luminoforem, který následně světélkuje ve viditelné oblasti spektra.

Mohou být tvaru rovného (délka 60 cm, výkon 20 W), spirálovité nebo tzv. U-trubice (délka 18 cm, výkon 18 W). Umisťují se standardně do vzdálenosti 40 cm od povrchu těla, ve spektru speciálně modré produkují asi $24 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$.

Nevýhodou je, že s časem jejich kvalita degeneruje, takže se musí vyměňovat, a produkují značné množství tepla, tudíž vyžadují chlazení.



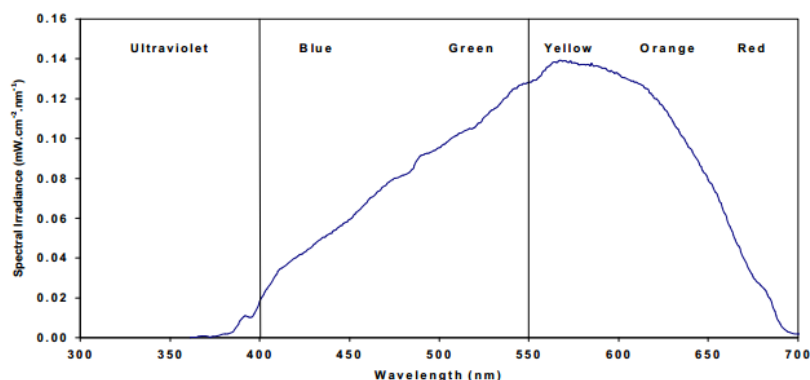
Obrázek 2: Emisní spektrum modré zářivky (vlevo) a bílé (vpravo) [31]



Obrázek 3: Srovnání rychlosti poklesu bilirubinu při fototerapii světlem emitovaným zářivkou - modrou a modrozelenou [37]

- **Wolframová halogenová žárovka** (bílá)

Halogenové žárovky jsou žárovky plněné plynem s příměsí halogenů. Vláknko je klasicky wolframové a baňka je vyrobena z křemenného skla. Uvnitř probíhají halogenové cykly – wolfram se při vysokých teplotách odpařuje a následně slučuje a rozpadá s halogeny. Díky tlaku wolframových par v okolí vlákna se omezuje jeho odpařování. Výhodou oproti klasické žárovce je tedy to, že je dosahováno vyšší světelné účinnosti (vláknko se žhaví na vyšší teplotu a wolfram se neusazuje na baňce – zůstává čirá) a delší životnost. Nevýhodou je značná emise tepla.



Obrázek 4: Emisní spektrum wolframové halogenové žárovky [32]

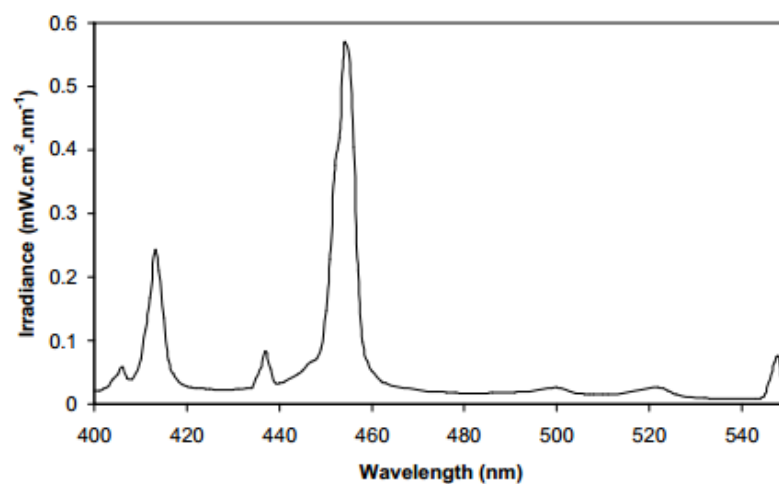
- **Halogenidová výbojka** (bílá)

Halogenidové výbojky jsou vysokotlaké výbojky podobné rtuťovým, ale plyn v trubici obsahuje halogenidy různých kovů (ve fototerapii se používají výbojky obsahující například jodid indný), které vylepšují svým hustým čárovým spektrem vlastnosti produkovaného světla a zvyšují světelný tok.

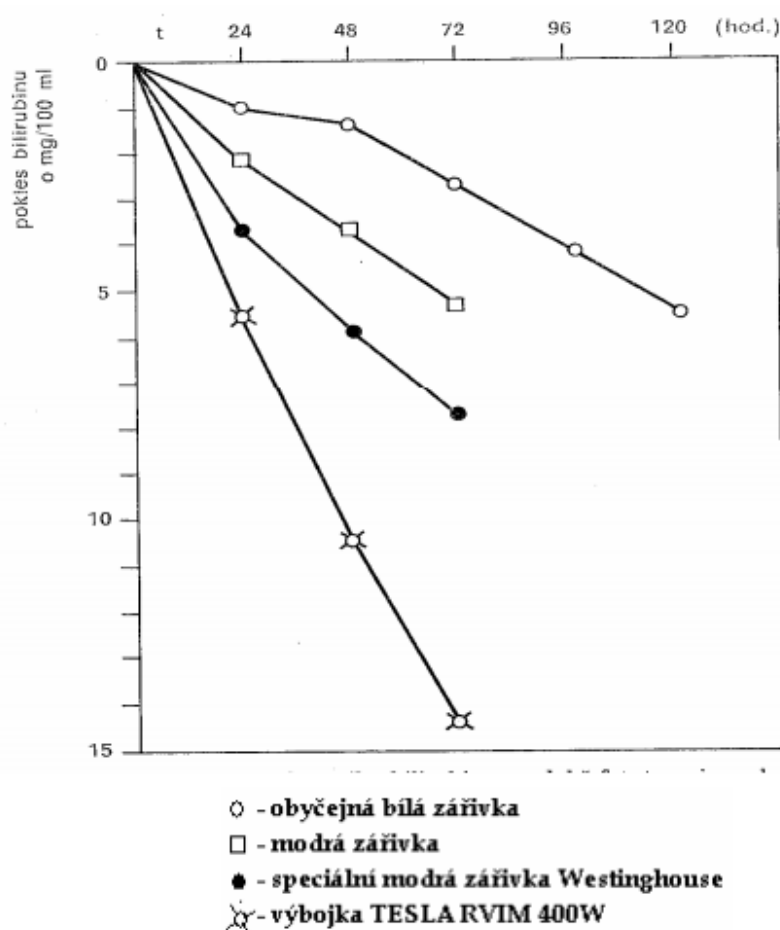
Lampy obsahují jednu nebo více výbojek najednou. Mohou poskytnout spektrální ozáření od $20 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$. Nevýhodou je, že hřejí – produkují infračervené záření, které musí být odfiltrováno.



Obrázek 5: Stojanová lampa s výbojkou [27]



Obrázek 6: Emisní spektrum halogenidové výbojky – tvar křivky je ovlivněn druhem přidaného halogenidu [33]

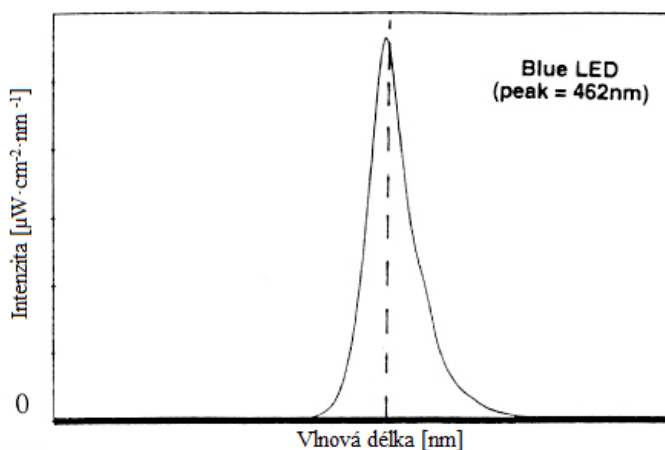


Obrázek 7: Srovnání účinnosti zářivek a halogenidové výbojky s příměsí jodidu indného (Tesla RVIM 400 W) při fototerapii [36]

- **LED diody** (GaN – Gallium, Nitrid; modré, zelené, bílé)
LED (z angličtiny Light Emitting Diode) jsou polovodičové součástky tvořené vrstvou P a N. Pokud začne diodou protékat proud v propustném směru, budou elektrony z N přecházet do P, kde se spojují s děrami, a při této rekombinaci se uvolňují fotony. Vlnová délka produkovaného záření, čili jeho barva, je dána výrobním materiálem. Výhodou je, že nehřejí, mají dlouhou životnost, nejsou drahé, neprodukují ultrafialové a téměř žádné infračervené záření (nemusí se používat filtry) a mají schopnost emitovat záření s vysokou spektrální ozářeností ($100 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$).



Obrázek 8: Lampa s LED zářičem [28]



Obrázek 9: Emisní spektrum pro modrou LED [31]

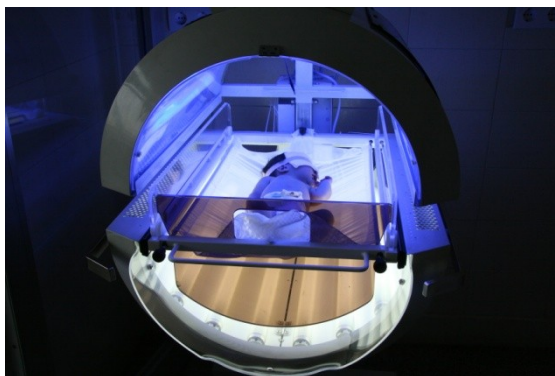
Konfigurace zářičů může být:

- **Konvenční** (CPT) – lampa umístěna na stojanu nad inkubátorem nebo vyhřívanou podložkou v doporučené vzdálenosti (obvykle cca 30 cm)
- **Postelové systémy** – jedná se o speciálně upravenou postel se zdrojem světla pod kojencem, nevyžaduje krytí zraku
- **Systémy s optickými vlákny** – optická vlákna vedou studené světlo od zdroje do flexibilní podložky. Hlavní výhodou je to, že nevzniká žádné nežádoucí teplo, proto může být podložka v přímém kontaktu s kojencem. Spektrální ozáření dosahuje více než $35 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ a nevyžaduje se krytí zraku. Během terapie je dítě zabaleno v podložce, takže může být chováno nebo eventuálně nakojeno.



Obrázek 10: Postelový systém s optickými vlákny [29]

- **Kombinovaná** – kombinace výše uvedených konfigurací, velice efektivní z hlediska maximalizace BSA



Obrázek 11: Kombinovaný systém pro fototerapii [30]

Vzhledem k tomu, že jsou tyto zářiče využívány pro fototerapii na neonatologických odděleních, kde je potřeba obzvláště pečlivě dbát na dodržení bezpečnostních mezí pro použité záření a hlídat dávku záření, která přímo souvisí s účinností terapie, je nezbytně nutné je pravidelně **validovat**. Rovněž potencionální zákazníci výrobců záříčů by měli mít možnost porovnat mezi sebou různé zdroje proměřením parametrů jimi emitovaného záření za stejných podmínek.

V klinické praxi se na neonatologických odděleních k proměřování nejčastěji využívají ruční spektrometry s rozsahem měřených vlnových délek okolo 460 ± 10 nm, jsou tudíž schopny měřit pouze modré světlo. Ne všechny zdroje ovšem emitují záření pouze v tomto úzkém rozsahu (viz. grafy emisních spekter uvedené výše), krom těch na bázi LED, proto je mnohem vhodnější používat univerzální kapesní měřič použitelný pro všechny typy zdrojů. Právě tyto podmínky splňuje **spektrofotometrický přístroj**, jehož vývoj je předmětem této diplomové práce a bude blíže popsán v následujících kapitolách.

[8], [34], [35], [36], [38]

3 Návrh spektrofotometrického přístroje

Blokové schéma přístroje je uvedeno na obrázku 12.

Ústřední součást přístroje tvoří jeho **senzor**. Vzhledem k tomu, že rozměry přístroje mají být omezeny na minimum, je vhodné zakomponovat mikrospektrometr s rozsahem měřených vlnových délek v pásmu viditelného spektra. Zvolena byla sestava Hamamatsu Mini Spectrometer C11351 se senzorem Mini - Spectrometer C10988MA-01, která je blíže popsána v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

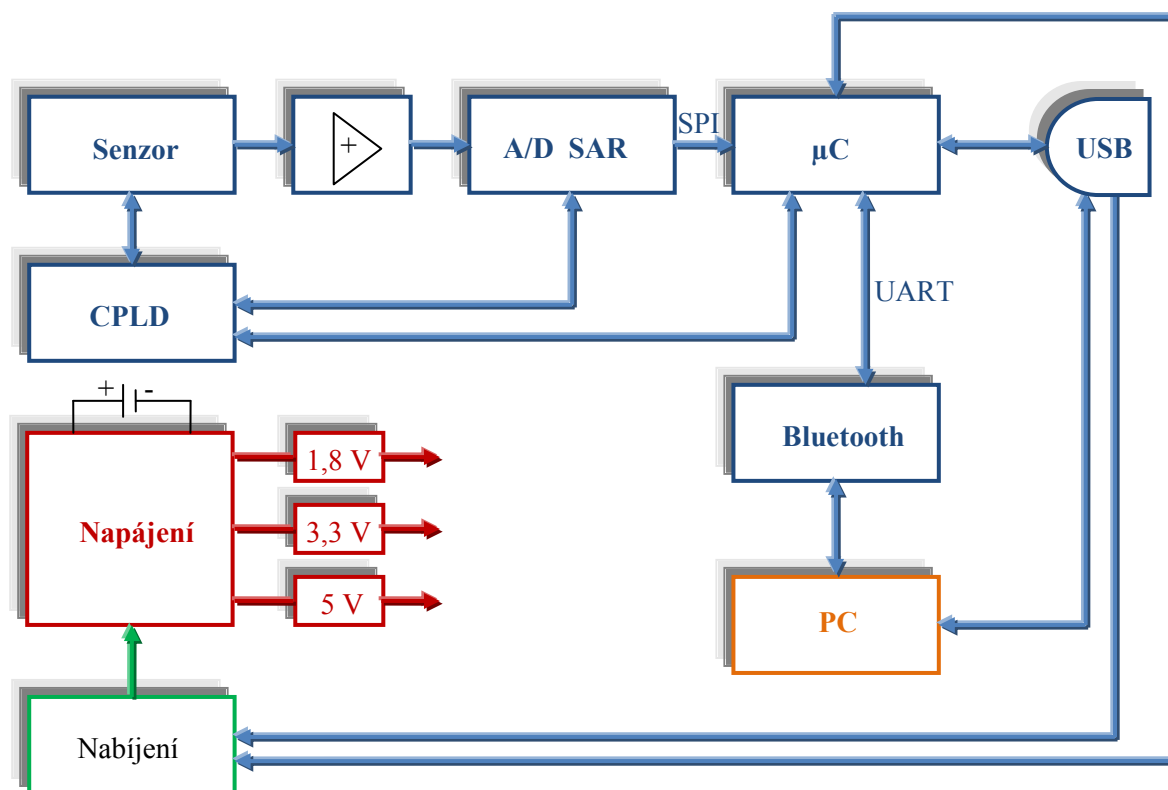
Následně je analogový signál potřeba zdigitalizovat. Neměnné vstupní parametry pro analogově - digitální převodník (zkratka ADC) zajistí impedanční oddělovací **operační zesilovač** se zesílením 1. **Analogově - digitální převodník** by měl být dostatečně rychlý, proto je zvolen typ s postupnou aproximací. V sestavě byl konkrétně využit 16bitový ADC Texas Instruments ADS8860 (viz. kapitola 4.2).

Dalším blokem je **mikrokontroler** (zkratka μC), který zajistí komunikaci s počítačem, bude řídit nabíjení a číst stav baterie. Diskrétní data budou přenášena z ADC po SPI (Serial Peripheral Interface) a ukládána do jeho paměti. Zvolen byl Freescale Kinetis MK64FN1M0VLL12 s jádrem ARM Cortex-M4 120 MHz. Blíže popsán v kapitole 4.3.

Pro sériový bezdrátový přenos dat mezi mikrokontrolerem a počítačem je potřeba zaimplementovat **Bluetooth modul**. Ten musí být dostatečně rychlý. Vybrán byl Panasonic PAN1026 Series s rychlostí přenosu 3Mb/s. Více v kapitole 4.4.

Synchronizaci mezi senzorem, ADC a mikrokontrolerem hodinovým taktem zajistí **komplexní programovatelný logický obvod (CPLD)** XILINX XC2C64 Cool runner (kapitola 4.5).

Napájení komponentů bude zajištěno akumulátorem Li-Ion. Výstupním napětím 5 V bude napájen samotný senzor a ADC, 3,3 V mikrokontroler, vnitřní logika CPLD využívá napětí 1,8 V a s daty operuje na úrovni 3,3 V. Schéma zapojení napájení je uvedeno v příloze III.



Obrázek 12: Blokové schéma navrženého spektrofotometru EPEM

4 Konstrukce prototypu

NEVEŘEJNÁ ČÁST PRÁCE

5 Software

Ovládací software pro spektrometr byl naprogramován v prostředí LabVIEW 2014 od National Instruments.

Po navázání komunikace mezi počítačem a přístrojem prostřednictvím Bluetooth program spektrometr ovládá (např. zadání integračního času), čte stav baterie a teplotu okolí (musí být ošetřeno, aby byl přístroj používán pouze při stanovených provozních teplotách), ale hlavně přijímá a následně zpracovává (převede a zkalibruje) naměřená data, která jsou poté použita pro výpočet požadovaných spektrometrických, radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin. Naměřená, resp. dopočtená, data mohou být následně prezentována také graficky v příslušných grafech.

V následujících kapitolách jsou blíže popsány nejdůležitější bloky programu, a to hlavně výpočetní. Numerický výpočet je obvykle následován náhledem na úsek zdrojového kódu, který danou problematiku řeší.

5.1 Převod posloupnosti pixelů na vlnové délky [nm]

Jak již bylo zmíněno v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Chyba! Nenalezen zdroj odkazů., záření vstupující do spektrometru je rozloženo, fokusováno a následně dopadá na lineární CMOS detektor. Výstupem je tedy posloupnost amplitud [AD Counts] příslušících řadě 256 pixelů. Každý pixel představuje určitou vlnovou délku v nanometrech, na kterou musí být převeden polynomem:

$$\text{Wavelength [nm]} = A_0 + B_1 \cdot \text{Pixnr} + B_2 \cdot \text{Pixnr}^2 + B_3 \cdot \text{Pixnr}^3 + B_4 \cdot \text{Pixnr}^4 + B_5 \cdot \text{Pixnr}^5 \quad (1)$$

Pixnr...číslo příslušného pixelu

Koeficienty:

$$A_0 = 3,151617422 \cdot e^2$$

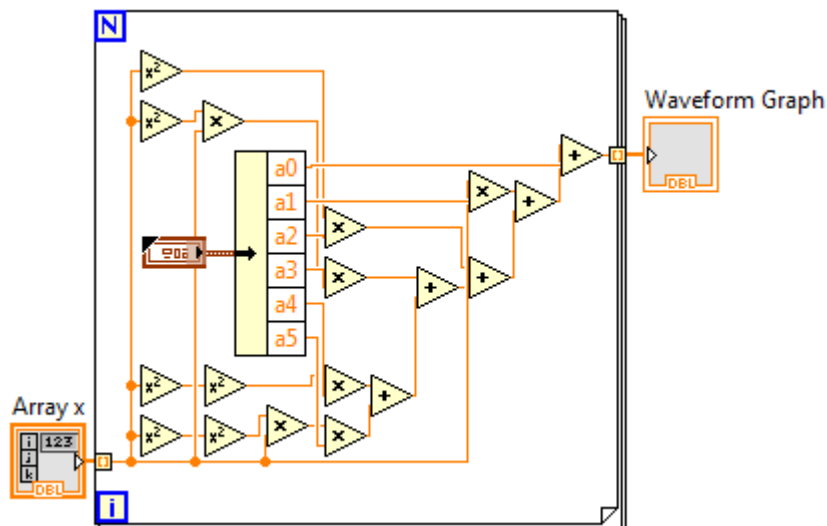
$$B_1 = 2,3981811$$

$$B_2 = -9,48674388 \cdot e^{-4}$$

$$B_3 = -4,129168351 \cdot e^{-6}$$

$$B_4 = -2,964039874 \cdot e^{-9}$$

$$B_5 = 2,0914504 \cdot e^{-11}$$



Obrázek 13: Převod posloupnosti pixelů na vlnové délky [nm] v LabVIEW

5.2 Kalibrace spektrometru

Před započítím měření je potřeba provést kalibraci přístroje - je nezbytné zohlednit jeho citlivost, čili to, jak reaguje na záření jednotlivých vlnových délek.

K zjištění citlivosti spektrometru musí být k dispozici kalibrační lampa opatřená certifikátem, ve kterém je výrobcem uvedeno, jak lampa na jednotlivých vlnových délkách září (jaký zářivý výkon dopadá v dané vzdálenosti na jednotku plochy). Pokud je lampa změřena analyzovaným spektrometrem, a získané spektrum je porovnáno se spektrem udaným výrobcem, lze zjistit, jaké je ozáření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$] spektrometru na dané vlnové délce. Pokud je cílem provádět spektrometrem absolutní měření intenzity, musí být vzaty v úvahu také podmínky měření, tj. vzdálenost zdroje záření od senzoru a integrační čas $t_{\text{int.cal.}}$.

Citlivost lze následně vypočíst dosazením do vztahu:

$$\text{spektrální citlivost} = \frac{\text{naměřené spektrum lampy (refcal - darkcal)}}{\text{spektrum lampy udané výrobcem (Caldata)}} \cdot \frac{1}{t_{\text{int.cal.}}} \quad (2)$$

Refcal...amplituda [AD Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na zapnuté kalibrační halogenové lampě

Darkcal...amplituda [AD Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na vypnuté kalibrační halogenové lampě

Caldata...intenzita záření [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na normalizovaném zdroji - kalibrační lampě

Při měření byla použita kalibrační wolframová halogenová lampa AvaLight- HAL s dobou ustálení 15 minut.

[5], [7]

5.2.1 Převod amplitudy spektrálních čar [AD Counts] na ozáření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]

Spektrofotometr neměří spojité spektrum, ale čárové (vzorky nejsou odebírány kontinuálně, ale s určitým krokem, daným rozlišením snímače).

Primárně je intenzita jednotlivých spektrálních čar udávána v relativních jednotkách [Counts], které v podstatě odpovídají náboji, jež přístroj zaznamená na jednotlivých vlnových délkách. Aby byl získán výstup odpovídající radiometrické veličině ozáření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], musí být provedena konverze podle daného algoritmu.

Co se týče samotného měření, zdroj musí být umístěn do stejné vzdálenosti od optického vlákna, jako byla umístěna kalibrační halogenová lampa při kalibraci. Při výpočtu musí být rovněž zohledněna získaná citlivost spektrometru a integrační čas použitý při měření t_{int} .

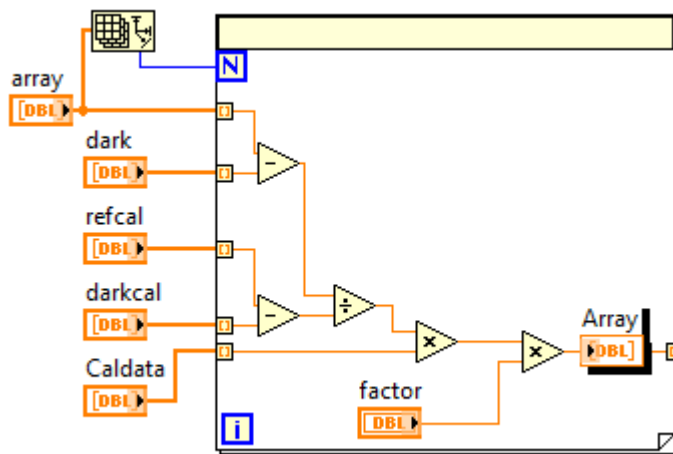
Vztah poté vypadá takto:

$$\text{reálné spektrum} = \frac{\text{naměřené spektrum (sample - dark)}}{\text{citlivost}} \cdot \frac{1}{t_{\text{int}}} \quad (3)$$

Sample...amplituda [AD Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřena na zapnutém analyzovaném zdroji

Dark...amplituda [AD Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřena na vypnutém analyzovaném zdroji

[5], [6], [7]



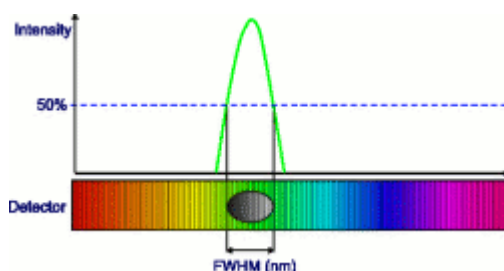
Obrázek 14: Kalibrace spektrometru v LabVIEW

5.3 Spektrometrie

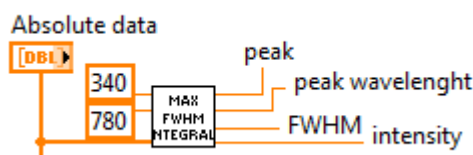
V rámci jednoduché charakteristiky naměřeného spektra se obvykle stanovuje **vlnová délka a amplituda maxima křivky** (peaku), **šířka pásma (FWHM**, z angličtiny Full Width Half Maximum, tj. šířka špičky tehdy, kdy je intenzita rovna 50 % ze svého maxima) a integrál křivky, který odpovídá naměřené **intenzitě**.

V LabVIEW byly tyto veličiny vypočteny za použití funkce max_integral_FWHM.vi.

[11]



Obrázek 15: Šířka pásma (FWHM) [47]



Obrázek 16: Výpočet peaku, intenzity a FWHM v LabVIEW pomocí funkce max_integral_FWHM.vi

5.4 Kolorimetrie

Kolorimetrie je měřicí metodou a vědou, zabývající se hodnocením barev, resp. vjemů, které barvy vyvolávají. Je založena na standardech Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE - Commission Internationale de l'Éclairage). Můžeme díky ní, mimo jiné, charakterizovat jakoukoliv barvu trichromatickými souřadnicemi x , y , z . [8], [9]

5.4.1 Barva

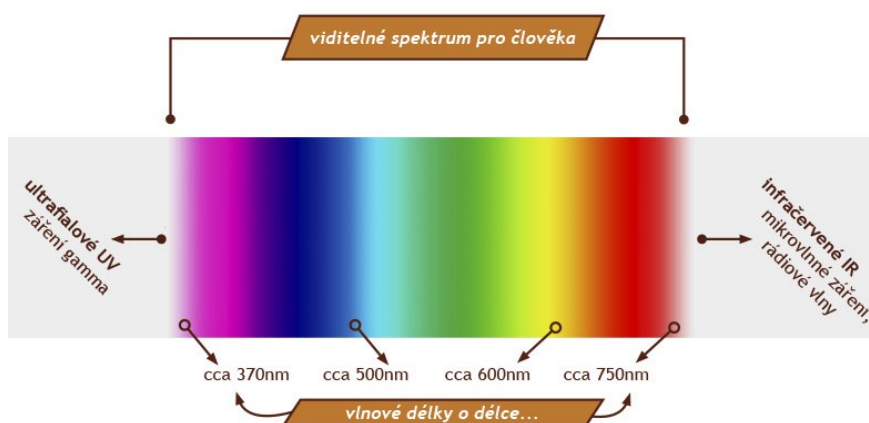
Světlo je viditelnou složkou elektromagnetického záření, a je charakterizováno vlnovou délkou λ [nm, nanometr], čili vzdáleností vrcholů dvou sousedních vln, a frekvencí f [Hz, Hertz]. Obecně platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

c...rychlost šíření světla ve vakuu, $c = 299\,792\,498 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Dále jej lze definovat jako proud fotonů nebo svazek paprsků. Šířka spektra světla se pohybuje v rozmezí od 380 do 760 nm, a v těchto mezích je lidské oko schopno rozlišit zhruba 400 tisíc různých barev.

Monochromatické složky záření (tj. složky záření o jednotlivých vlnových délkách) viditelného spektra vzbuzují zcela určitý barevný počitek, jinými slovy každá vlnová délka viditelného spektra vyvolá vjem o jiné barvě.



Obrázek 17: Barvy viditelného spektra [24]

Tabulka 4: Rozsahy vlnových délek spektrálních barev [8]

Spektrální rozsah λ [nm]	Barva světla
380 - 430	Fialová
430 - 465	Modrofialová
465 - 490	Modrá
490 - 500	Modrozelená
500 - 560	Zelená
560 - 575	Zelenožlutá
575 - 585	Žlutá
585 - 620	Oranžová
620 - 770	Červená

Kromě spektrálních barev existují i nespektrální barvy, které nejsou součástí ani spektra slunečního záření. Patří mezi ně purpurové barvy, jež vznikají mísením barev krajních částí spektra viditelného záření (fialovou a červenou).

Barva světla, pocházející z primárních světelných zářičů, má určité vlastnosti, jež jsou označovány jako barevnost (**chromatičnost**), a jsou dány spektrálním složením záření vysílaného zdrojem. Barevné vlastnosti předmětů (sekundárních světelných zářičů), na které světlo dopadá, jsou

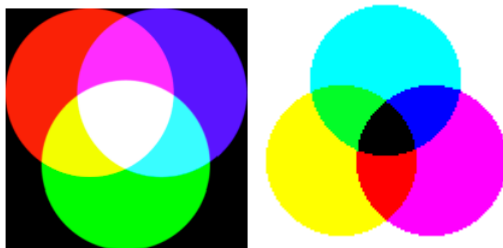
oproti tomu označovány jako **kolorita**, a určuje je spektrální složení záření, jež osvětluje sledovaný předmět, a také spektrální odraznost či propustnost povrchu předmětu. Vjem je tedy dán celkem třemi faktory (zdrojem světla, pozorovaným předmětem a pozorovatelem). Aby byla měření objektivní, bylo potřeba tyto faktory standardizovat. O standardizaci se od roku 1931 stará CIE, a schvaluje doporučení, na kterých je kolorimetrie postavena. Patří mezi ně definování standardních zdrojů světla, podmínek pro osvětlování a pozorování, etalonů činitele odrazu, definic standardního pozorovatele a vytvoření složek a barevných prostor charakterizujících barvu.

Barvu světla a tělesa lze také posuzovat podle psychofyzikálních atributů:

- **Tónu** (odstínu, anglicky Hue) barvy - tón barvy je určen jejím spektrálním složením. Barvy v reálném světě obvykle nejsou monochromatické (tj. složené ze záření o pouze jedné vlnové délce), ale jsou tvořeny směsicí více spektrálních složek o různých vlnových délkách. Podle toho, která ze složek je převládající, je následně určen odstín barvy.
- **Sytosti** (čistoty, anglicky Saturation, Purity) barvy - vyjadřuje to, z jaké míry je v určité barvě zastoupena čistá sytá barva na úkor neutrální bílé (syté barvy bílou složku neobsahují, jsou tvořeny málo světlý, ideálně jedním monochromatickým, zatímco nesyte barvy jsou vlastně bílé s barevnou příměsí).
- **Jasu** (anglicky Lightness, Brightness) barvy - jas je část zrakového vjemu, díky kterému vnímáme intenzitu barvy. Čím je jas nižší, tím větší je v barvě podíl černé.

Barvy samotné lze rozdělit na základní (modrá, zelená, červená) a doplňkové (žlutá, purpurová, modrozelená), které získáme smícháním dvou sousedních základních barev.

Vhodným **aditivním** mísením základních barev (červená, zelená, modrá) můžeme od černé (neobsahuje žádnou barvu) získat libovolný odstín barvy, až po bílou (když smícháme všechny spektrální světla). Rovněž existuje tzv. **subtraktivní** (odčítací) mísení barev, při kterém se z polychromatického bílého světla odebírají určité spektrální složky. Tento typ mísení lze realizovat použitím filtrů.



Obrázek 18: Aditivní [vlevo, 9] a subtraktivní [vpravo, 12] mísení barev

Lidské oko nemá schopnost ve složeném světle jednotlivé spektrální komponenty rozeznat, na rozdíl od sluchu, kdy jsme schopni ve složeném tónu rozlišit jednotlivé tóny. Výsledné světlo je tedy okem vnímáno vždy jako jedna určitá barva. Ovšem existují rovněž metamerní barvy, to znamená, že jednu barvu lze vytvořit z mnoha spektrálních kombinací (tj. barvy se mohou jevit jako shodné, i když mají různé spektrální složení). Díky tomu, že je lidské oko schopno barvy syntetizovat, můžeme vnímat i barvy purpurové, které jinak součástí spektra nejsou.

[8], [9], [11], [12], [14], [44]

5.4.2 Standardní zdroje světla

Světelné zdroje, používané při měření k osvětlování pozorovaných předmětů, musí svým spektrálním složením co nejlépe simulovat zdroje používané v praxi. Nejdůležitějším a nejstandardnějším světelným zdrojem je Slunce. Zdroje světla jsou charakterizovány teplotou chromatičnosti (viz. kapitola 5.4 Kolorimetrie) a spektrální hustotou zářivého toku M .

$$M_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{T_{\lambda}}} - 1}, \quad (5)$$

kde $C_1, C_2 \dots$ konstanty

CIE definovala 4 základní zdroje světla – A, B, C, D. V rámci národních norem byly dále stanoveny zdroje E, I nebo například TL84.

- Zdroj A – odpovídá umělému žárovkovému osvětlení s teplotou chromatičnosti 2856 K
- Zdroj B – odpovídá střednímu dennímu světlu s převažující složkou přímého slunečního svitu s ekvivalentní teplotou chromatičnosti 4874 K
- Zdroj C – odpovídá průměrnému dennímu světlu bez přímého slunečního svitu s ekvivalentní teplotou chromatičnosti 6774 K
- Zdroj D – odpovídá průměrnému dennímu světlu s ekvivalentní teplotou chromatičnosti od 4000 do 25000 K, nejčastěji se užívá zdroj typu D65 (6504 K)

[44]

5.4.3 Barevné vidění – definice standardního pozorovatele

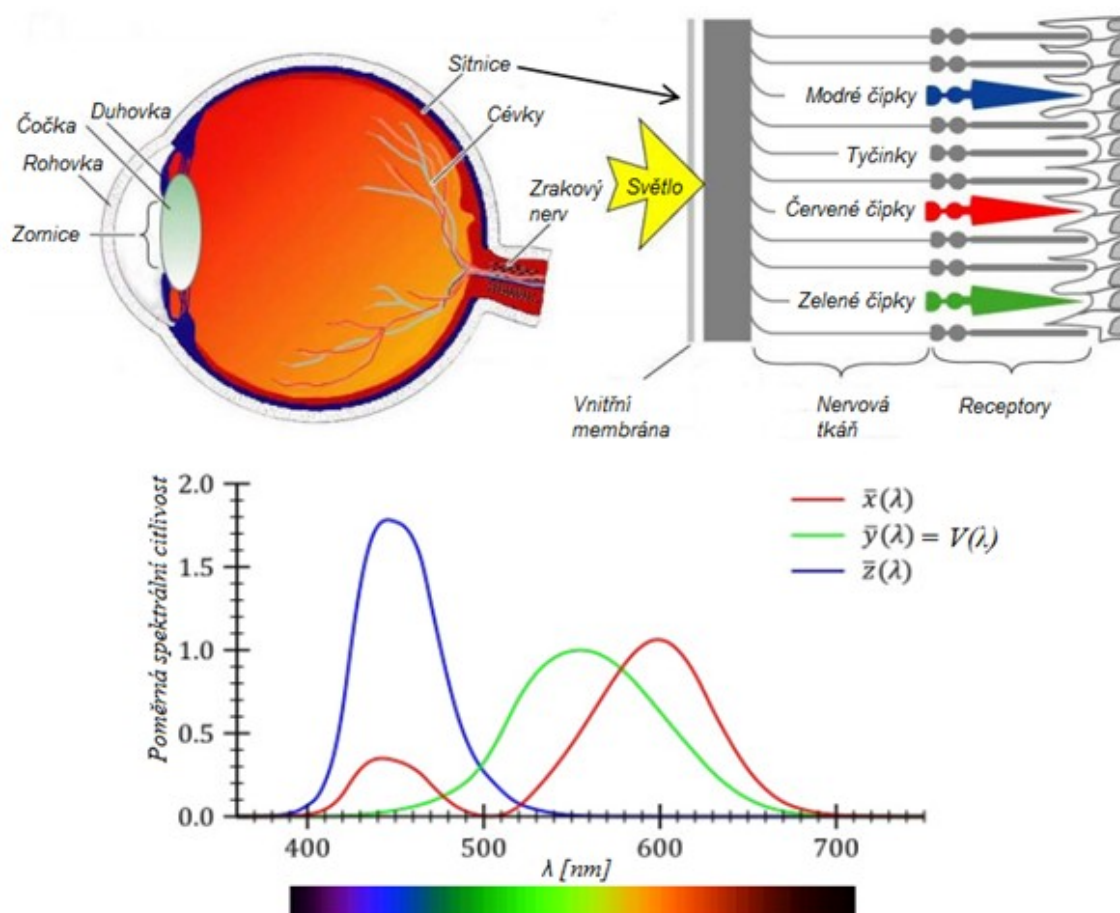
Rozlišování barev lidským okem je založeno na schopnosti rozeznat tři základní barvy třemi typy senzorů (citlivými přibližně na purpurově červenou, žlutozelenou a modrofialovou barvu). Nejcitlivěji jsou vnímány barvy žluté. Co se týče výše zmíněných senzorů, jsou jimi světločivé buňky nacházející se na sítnici. Základní dělení těchto receptorů je na tyčinky (uplatňují se hlavně při noční vidění v odstínech šedé) a čípky (uplatňující se právě při rozlišování barev). Čípky se podle trichromazie (třísložkové teorie) dále rozdělují do tří skupin, a to na ty, které jsou nejcitlivější na vlnové délky okolo 630 nm (červená), 530 nm (zelená) a 450 nm (modrá). Dopadající polychromatické světlo podráždí zároveň všechny tyto typy senzorů, ale pokaždé v jiné míře. Zjednodušeně lze tedy říci, že vjem barvy je dán třemi signály ze tří druhů senzorů.

Spektrální citlivost jednotlivých typů receptorů byla stanovena experimentálně v roce 1931 Mezinárodní komisí pro osvětlení. 17 osob bez poruchy barvocitu se snažilo pomocí tří monochromatických světél vytvořit barvu odpovídající předloze. Výstupem experimentu byly trichromatické koeficienty $(\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda})$ pro 2° standardního pozorovatele - cílový objekt byl pozorován pod úhlem 2°, čímž je na sítnici vymezena žlutá skvrna (macula). Tento standard je užíván nejčastěji.

V roce 1964 byl také definován tzv. doplňkový 10° standardní pozorovatel, protože v praxi vniká záření do oka pod větším pozorovacím úhlem, a na vzniku vjemu se podílí kromě čípků i tyčinky. Tento typ standardu je vhodnější pro hodnocení barevnosti větších ploch.

Hodnoty koeficientu \bar{y}_{λ} jsou shodné s hodnotami poměrné spektrální citlivosti $V(\lambda)$ normálního pozorovatele.

[8], [9], [10], [11], [44]



Obrázek 19: Trichromatické koeficienty CIE 1931 [upraveno z 22 a z 23]

5.4.4 CIE 1931 barevný prostor XYZ

Libovolný barevný podnět, který potom u pozorovatele vybudí vjem o téže barvě, lze vytvořit adiční směsí tří barevných komponent. Jejich množství (váhové zastoupení v každé barvě) je vyjádřeno **trichromatickými složkami** (označovanými X, Y, Z). Hodnota Y udává i průměrné osvětlení čípků, čili vyjadřuje jas barvy. Lze je vypočítat na základě vztahů:

$$X = k \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} I_{\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \quad (6)$$

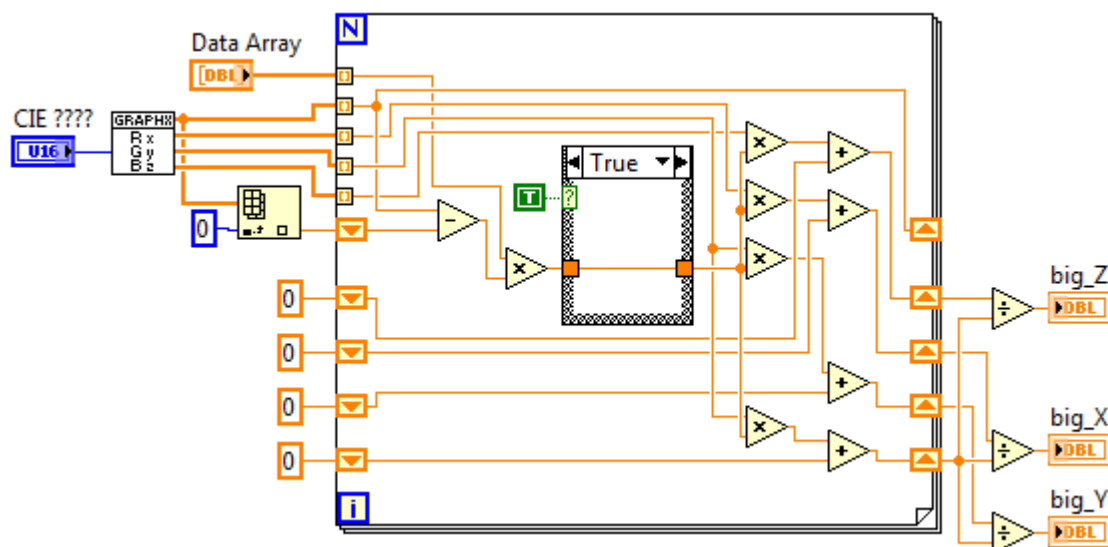
$$Y = k \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} I_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \quad (7)$$

$$Z = k \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} I_{\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{\sum \bar{y}_\lambda} \quad (9)$$

I_λ ...spektrální ozáření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$] pro vlnovou délku λ

$\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$...trichromatické koeficienty standardního pozorovatele podle CIE 1931 nebo 1964 pro rozsah vlnových délek od 380 do 780 nm



Obrázek 20: Výpočet X, Y, Z v LabVIEW

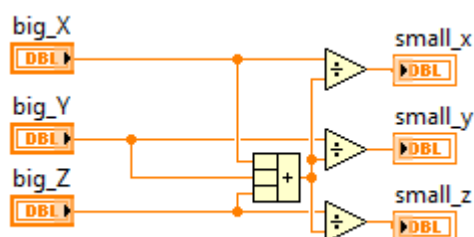
Trichromatické souřadnice pak stanovujeme za použití těchto vztahů:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (10)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (11)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (12)$$

Hodnota z se obvykle neuvádí, neboť platí, že $x + y + z = 1$.



Obrázek 21: Výpočet x, y, z v LabVIEW

Známe-li složky x a y , můžeme všechny barvy vyjádřit pomocí dvourozměrného diagramu chromatičnosti CIE xyY. Křivka, která ho ohraničuje, je určena na základě vztahů:

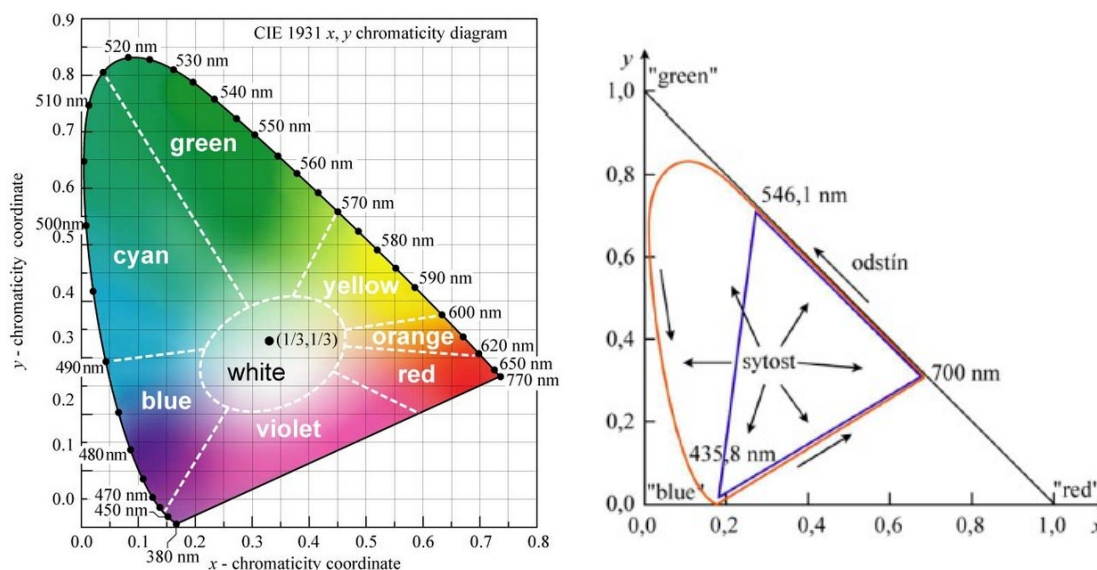
$$x_{CIE\ xy} = \frac{\bar{x}_\lambda}{\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda} \quad (13)$$

$$y_{CIE\ xy} = \frac{\bar{y}_\lambda}{\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda} \quad (14)$$

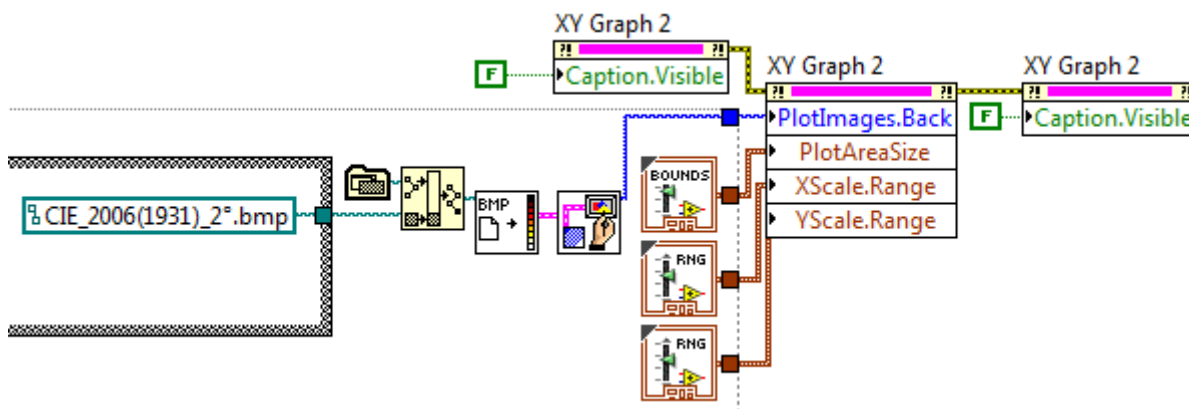
$\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda \dots$ trichromatické koeficienty standardního pozorovatele podle CIE 1931 nebo 1964 pro rozsah vlnových délek od 380 do 780 nm

Na této křivce se nachází barevné body o vlnových délkách od 380 po 770 nm (spektrální barvy od fialové po červenou). Přímka spojující koncové body křivky se nazývá purpurová linie, a představuje nespektrální barvy. Sytost (čistota) daných barev se snižuje směrem ke středu, kde leží bílý bod o souřadnicích $[1/3; 1/3]$, takže pokud spojíme libovolný obvodový bod s bodem bílým, na vzniklé spojnici budou ležet barvy stejného odstínu, ale o různé sytosti.

Podmnožinou diagramu chromatičnosti CIE xyY je tzv. gamut (diagram chromatičnosti prostoru RGB), který je vymezen trojúhelníkem, jehož vrcholy odpovídají vlnovým délkám pro červenou (700 nm), zelenou (546,1 nm) a modrou (435,8 nm) barvu. Barvy se souřadnicemi umístěnými mimo tento trojúhelník nelze vytvořit mísením těchto základních tří barev. Diagramy chromatičnosti se obvykle využívají ke srovnávání gamutů jednotlivých zařízení.



Obrázek 22: Diagram chromatičnosti CIE xyY 1931 [vlevo: 21, vpravo: 10]



Obrázek 23: Vykreslení diagramu CIE 1931 v LabVIEW - dopočetní obalové křivky a následné vyplnění barevnou mapou

Polychromatickou barvu lze popsat prostřednictvím **dominantní vlnové délky** λ_d [nm]. Je to vlnová délka barevného odstínu, který ve směsi barev převládá. Z diagramu chromatičnosti (Obrázek 24) se určuje tak, že se úsečkou spojí barevný bod P [x; y] a standardní bílý bod W [1/3; 1/3]. Tato úsečka se protáhne tak, aby protнула obalovou křivkou diagramu, a právě v tomto místě leží λ_d .

Dominantní vlnovou délku lze vypočítat také numericky aproximativně, se zahrnutím konstant popisujících standardní zdroje světla a standardního pozorovatele. Tento způsob výpočtu byl použit při programování softwaru v LabVIEW. Pokud je výpočet prováděn pro 2° pozorovatele, je vhodné do něj zahrnout standardní zdroj světla typu C, pokud pro 10° pozorovatele, zdroj typu D 65.

Pokud se ale vlnová délka směsi nachází v intervalu od 700 do 780 nm (odstíny purpurové), stanovuje se **komplementární vlnová délka** λ_c [nm], jejíž význam je obdobný. Tyto odstíny na diagramu (Obrázek 24) leží v trojúhelníkové oblasti WBA. V tomto případě jde o bod Q, který se přímkou spojí s bodem W. Linie purpurové je protnuta v bodě L a λ_c se vyskytuje v místě průsečíku přímky a obalové křivky diagramu.

Čistota barvy (syty, z angličtiny Purity) [%] umožňuje posoudit, z jaké části se podílí čistá pestrá barva (náležící dominantní vlnové délce) na celkovém vjemu sledované barvy. Psychofyzikálnímu pojmu čistota barvy odpovídá psychosenzorický pojem syty barvy. Syté barvy neobsahují bílou složku vůbec, naopak nesyaté barvy jsou vlastně bílé s barevným nádechem.

Souřadnicová čistota barvy se spočítá podle vztahu:

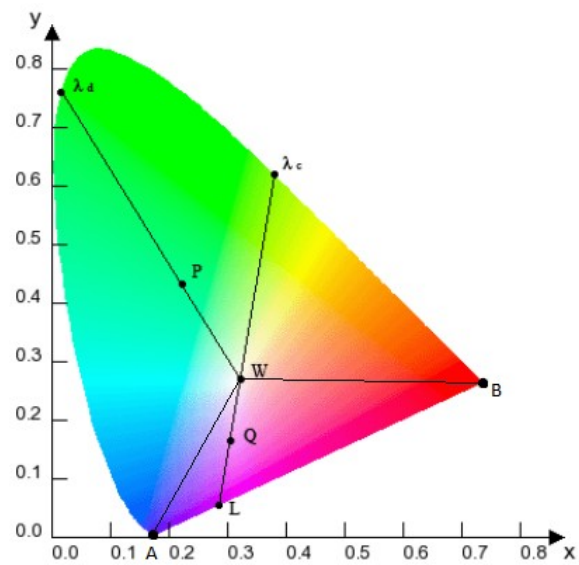
$$p_e = \frac{\sqrt{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2}}{\sqrt{(x_w - x_D)^2 + (y_w - y_D)^2}} \quad (15)$$

x, y ...trichromatické souřadnice měřené barvy

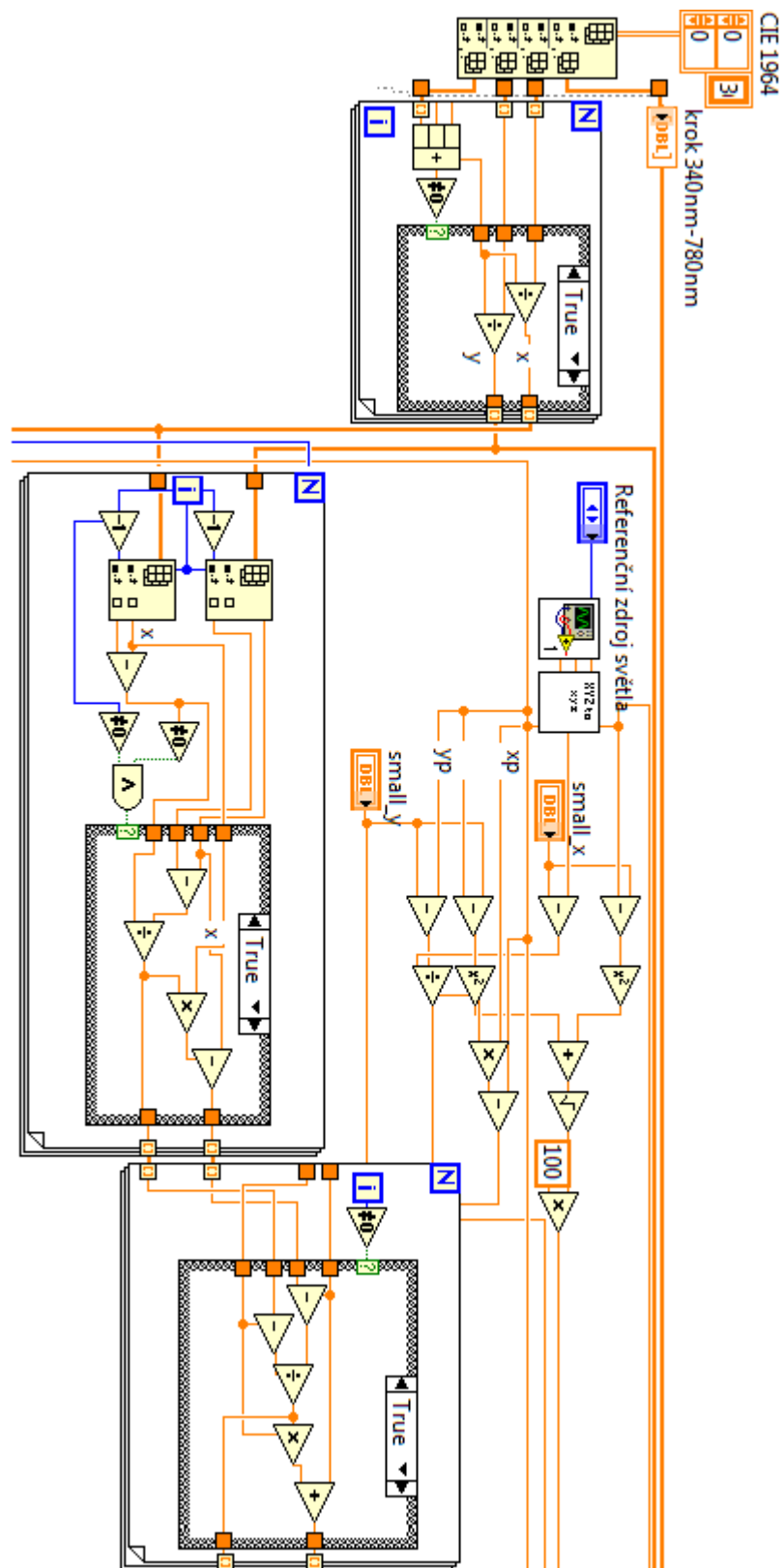
x_w, y_w ...trichromatické souřadnice smluvního bílého světla [0,3333; 0,3333]

x_d, y_d ...trichromatické souřadnice spektrálního světla, které přísluší dominantní vlnové délce λ_d měřené barvy

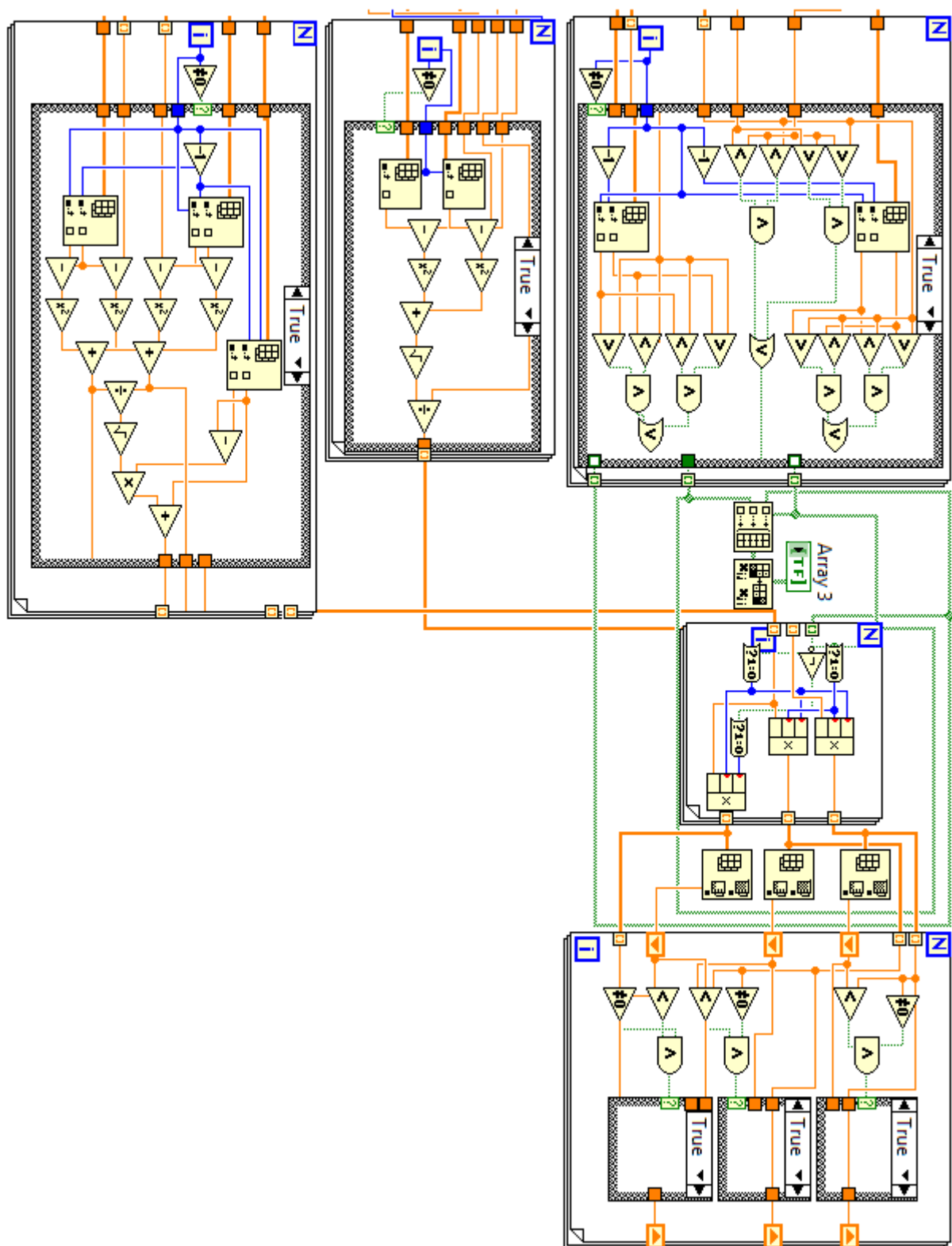
Na obrázku 33 je sytost barvy dána poměrem úseček $W - P$ a $W - \lambda_d$, který je následně vynásoben 100.



Obrázek 24: Diagram chromatičnosti [17]



Obrázek 25: Algoritmus pro výpočet λ_D , λ_C a čistoty barvy v LabVIEW - 1. část



Obrázek 26: Algoritmus pro výpočet λ_D , λ_C a čistoty barvy v LabVIEW - 2. část

V kolorimetrickém trojúhelníku xy neodpovídají stejné vzdálenosti mezi dvěma body stejným rozdílem v subjektivním vnímání barvy, proto byly zavedeny **další vizuálně rovnoměrné kolorimetrické soustavy** (viz. následující kapitoly).

[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]

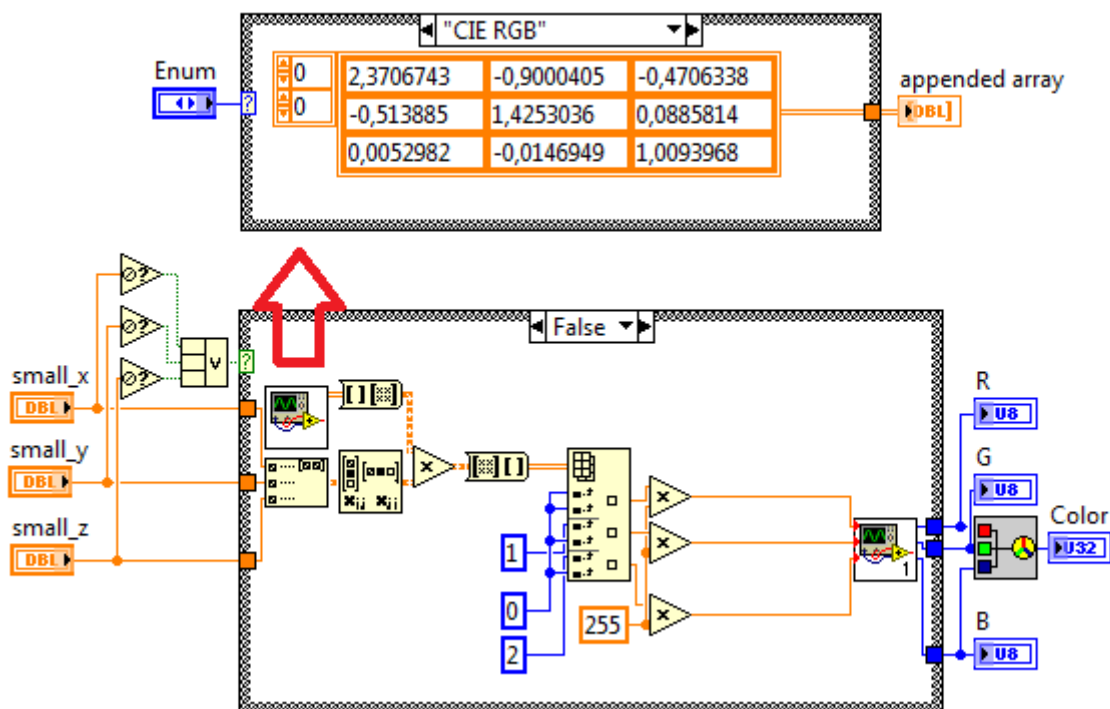
5.4.5 RGB

Převod z XYZ na RGB (červenou, modrou a zelenou složku) je nezbytný k určení barvy analyzovaného zdroje nebo předmětu. Lze jej provést na základě vzorce:

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = [M]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[M]^{-1} = \begin{bmatrix} 2,3706743 & -0,9000405 & -0,4706338 \\ -0,5138850 & 1,4253036 & 0,0885814 \\ 0,0052982 & -0,0146949 & 1,0093968 \end{bmatrix}$$

Barva je poté v LabVIEW určena za použití instrumentací RGB_to_full_light.vi a RGB_to_Color.vi.

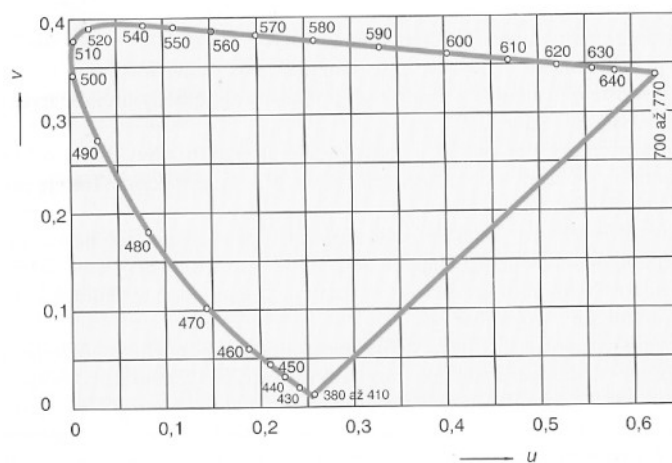


Obrázek 27: Převod x, y, z na R, G, B a zjištění barvy v LabVIEW

[48]

5.4.6 CIE 1960 barevný prostor UCS

Barevný prostor CIE UCS 1960 je oproti CIE 1931 XYZ rovnoměrný.

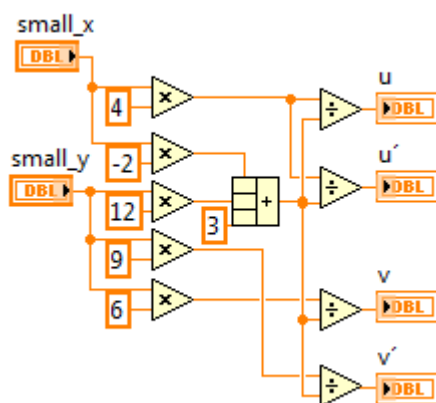


Obrázek 28: Rovnoměrný kolorimetrický prostor CIE UCS 1960 [8]

Souřadnice barvy u a v lze spočítat ze vztahů:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (17)$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (18)$$



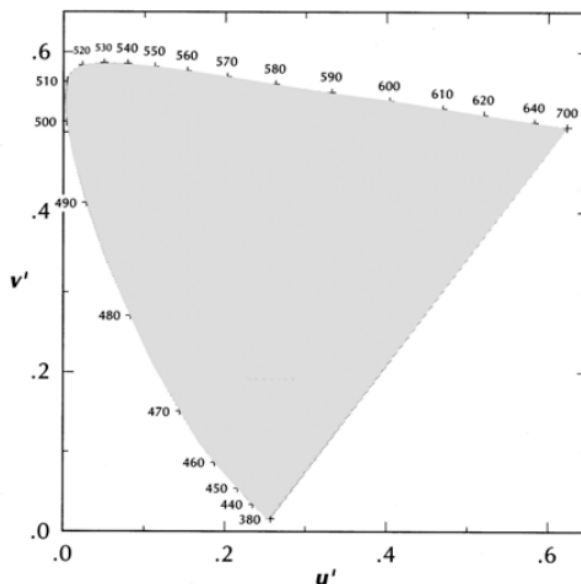
Obrázek 29: Výpočet u , v , u' , v' v LabVIEW

[46]

5.4.7 CIE 1976 barevný prostor L^* , u^* , v^* (LUV)

Jedná se o rovnoměrný kolorimetrický prostor využívaný v tiskárenství, v oboru světelných zdrojů a ve fotografii.

Při konstantním L^* (tj. pro barvy se stejnou subjektivní světlostí) je kolorimetrický trojúhelník přibližně rovnoměrný se souřadnicemi u' a v' .



Obrázek 30: Rovnoměrný kolorimetrický prostor CIE 1976 LUV [10]

Jestliže platí $Y/Y_0 > 0,008\,856$, potom:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (19)$$

Pokud $Y/Y_0 \leq 0,008\,856$, pak:

$$L^* = 903,3 \cdot \frac{Y}{Y_0} \quad (20)$$

$$u^* = 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_0) \quad (21)$$

$$v^* = 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_0) \quad (22)$$

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (23)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (24)$$

$$u'_0 = \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0} \quad (25)$$

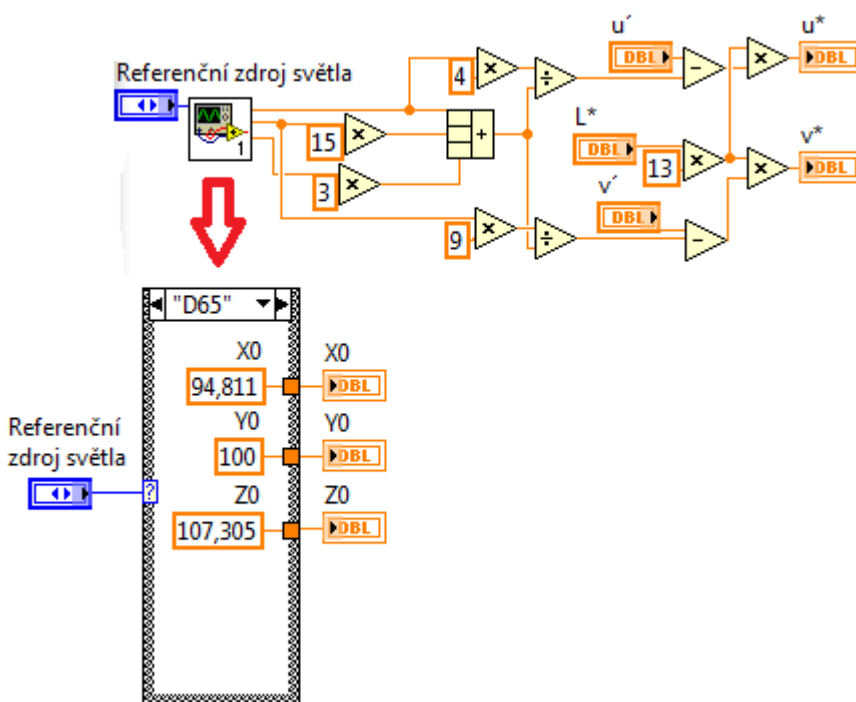
$$v'_0 = \frac{9Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0} \quad (26)$$

X, Y, Z...trichromatické hodnoty vzorku

X₀, Y₀, Z₀...trichromatické hodnoty normalizovaného světla použitého pro výpočet (konkrétní hodnoty viz. tabulka 5)

Vzdálenost ΔE^*_{uv} dvou barev se vypočítá podle vztahu:

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (27)$$

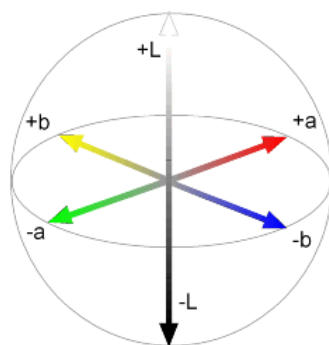


Obrázek 31: Výpočet u^* , v^* v LabVIEW

[8]

5.4.8 CIE 1976 barevný prostor L^* , a^* , b^* (Lab)

Tento pravoúhlý rovnoměrný kolorimetrický prostor se využívá zejména v textilním průmyslu. Jeho osy tvoří měrná světelnost L^* , která nabývá hodnot z intervalu 0 (černá) až 100 (bílá), a dvě chromatické osy a^* a b^* . Osa a^* probíhá od zelené barvy k červené, osa b^* od modré ke žluté.



Obrázek 32: Pravoúhlý kolorimetrický prostor CIE 1976 Lab [45]

Jestliže platí, že $X/X_0, Y/Y_0, Z/Z_0 > 0,008856$, potom:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (28)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (29)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (30)$$

Pokud $X/X_0, Y/Y_0, Z/Z_0 \leq 0,008856$, pak:

$$L^* = 903,3 \cdot \frac{Y}{Y_0} \quad (31)$$

$$a^* = 3893,5 \cdot \left[\frac{X}{X_0} - \frac{Y}{Y_0} \right] \quad (32)$$

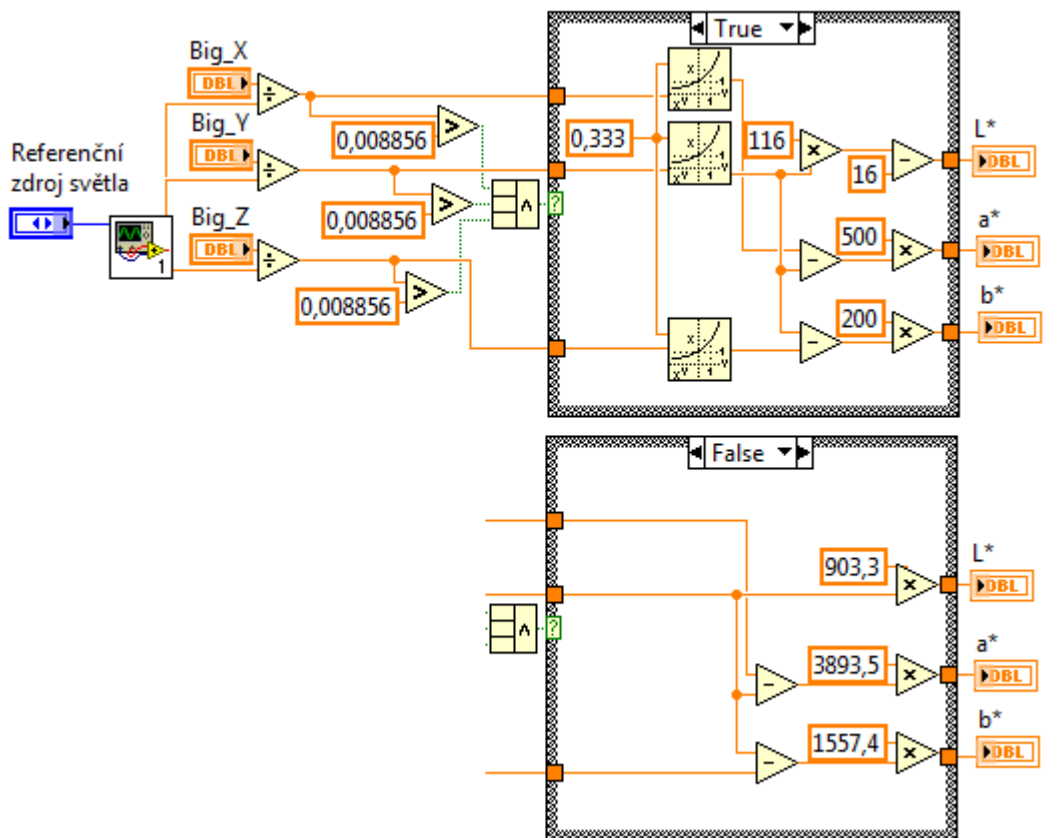
$$b^* = 1557,4 \cdot \left[\frac{Y}{Y_0} - \frac{Z}{Z_0} \right] \quad (33)$$

X, Y, Z ...trichromatické hodnoty vzorku

X_0, Y_0, Z_0 ...trichromatické hodnoty normalizovaného světla použitého pro výpočet

Tabulka 5: Hodnoty X_0, Y_0 a Z_0 pro vybrané standardní světelné zdroje

Zdroj světla	X_0	Y_0	Z_0
D65	94,811	100	107,305
A	111,144	100	35,2
TL84	103,863	100	65,607
C	97,285	100	116,145
F2 (CWF)	103,279	100	69,027



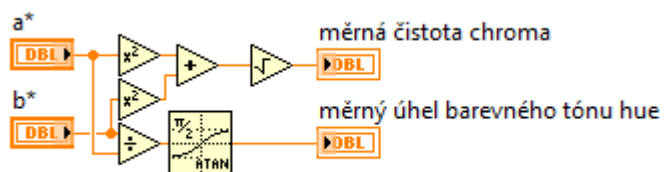
Obrázek 33: Výpočet L^* , a^* , b^* v LabVIEW

Výpočet měrné čistoty (chroma, sytosti) C_{ab}^* :

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (34)$$

Výpočet měrného úhlu barevného tónu (hue, odstín) h_{ab}° :

$$h_{ab}^\circ = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (35)$$



Obrázek 34: Výpočet měřeného úhlu a měrné čistoty v LabVIEW

Vzdálenost ΔE_{ab}^* dvou barev se vypočítá podle vztahu:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (36)$$

[8], [10], [44]

5.4.9 Jiné charakteristiky barev

Teplota chromatičnosti (zkratka CT, z angličtiny Color Temperature) je teplota absolutně černého tělesa (tj. tělesa pohlcujícího veškeré dopadající elektromagnetické záření) tehdy, kdy emituje záření, jež vyvolá v lidském oku stejný barevný vjem, jako námi pozorovaný zdroj. Jednotkou je Kelvin [K]. Vyšší teploty od 5000 K přísluší studeným barvám (modrá, bílá), nižší teploty 2700 až 3000 K teplým barvám (žlutá, červená). Křivka barev emitovaných černým tělesem se nazývá čára teplotního zářiče (z angl. Blackbody locus). CT se počítá pouze pro tzv. bílé světelné zdroje (nikoli pro monochromatické), které se od čáry teplotního zářiče odchyľují jen nepatrně (typicky žárovky). Výpočet je následující:

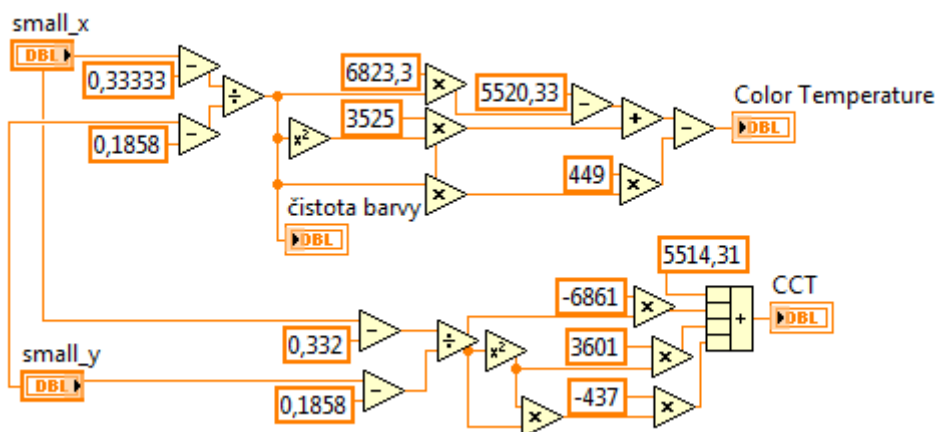
$$CT = -449p^3 + 3525p^2 - 6823,3p + 5520,33 \quad (37)$$

p...čistota barvy

Mnoho bílých světelných zdrojů (zářivky, výbojky, LED, ...) ovšem vyzařuje na náhradních barevných teplotách, které neleží přímo na čáře černého tělesa, ale na izotermních křivkách. Pak jsou charakterizovány **náhradí teplotou chromatičnosti** (zkratka CCT, z angličtiny Correlated Color Temperature), jež je opět vyjádřena v Kelvinech.

$$CCT = -437p^3 + 3601p^2 - 6861p + 5514,31 \quad (38)$$

p...čistota barvy



Obrázek 35: Výpočet CT a CCT v LabVIEW

[8], [11], [12], [42], [43]

5.5 Radiometrie

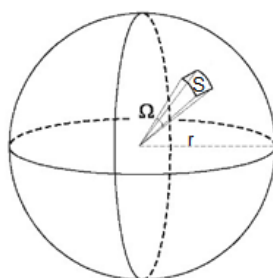
Radiometrie se zabývá měřením celého spektra elektromagnetického vlnění.

5.5.1 Související pojmy

Prostorový úhel Ω je část kulovitého prostoru, jež je ohraničena polopřímkami, majícími společný počátek ve středu této pomyslné koule. Jeho velikost [sr, steradián] je pak určena poměrem plochy S , kterou vytne na povrchu koule o poloměru r , a kvadrátu tohoto poloměru.

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (39)$$

Celému prostoru pak odpovídá prostorový úhel o velikosti 4π .



Obrázek 36: Prostorový úhel [upraveno z 20]

Bodový zdroj světla je takový, jehož rozměry jsou zanedbatelné vůči jeho vzdálenosti od pozorovatele. Rozměry **plošného zdroje** naopak v tomto smyslu zanedbatelné nejsou.

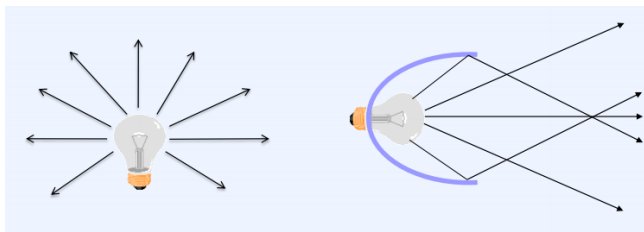
Vzhledem k tomu, že spektrofotometr je a bude používán pouze pro měření bodových zdrojů záření, nebudou v této práci vůbec rozebírány veličiny charakterizující plošné zdroje.

[6]

5.5.2 Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny popisují výkon zdroje záření, tudíž udávají množství energie, jež je transportována na ozařovaná tělesa. Patří mezi ně:

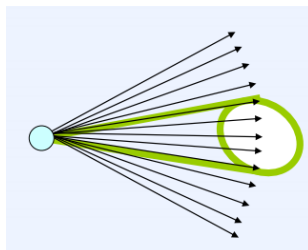
- **Zářivý tok Φ_e [W, Watt]:** Je to celková energie (optický výkon) vyzářená bodovým zdrojem do prostoru za jednotku času.



Obrázek 37: Grafické vyjádření zářivého toku [16]

- **Zářivost I_e [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$]**: Je to zářivý tok Φ_e vyzářený bodovým zdrojem do prostorového úhlu Ω . Pokud zářivost není závislá na směru vyzařování, hovoříme o izotropním zdroji záření.

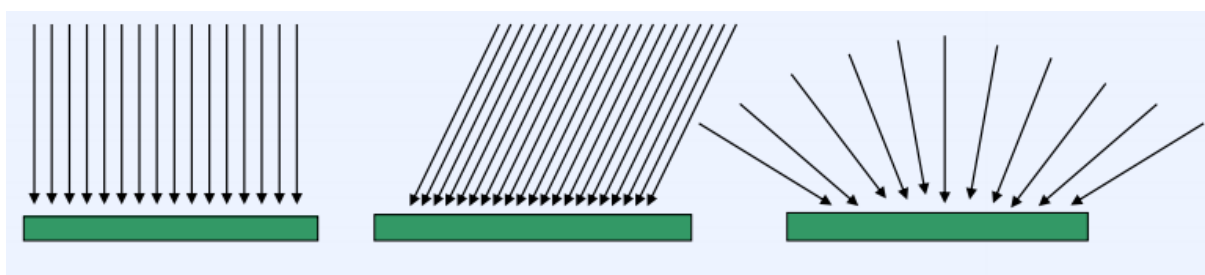
$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (40)$$



Obrázek 38: Grafické vyjádření zářivosti [19]

- **Ozáření E_e [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]**: Je to zářivý tok Φ_e dopadající na plochu S ozařovaného tělesa za jednotku času, nezávisle na úhlu dopadu.

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (41)$$



Obrázek 39: Grafické vyjádření ozáření – úhel dopadu není podstatný [16]

Všechny radiometrické veličiny lze vyjádřit jako spektrální, pokud je vyjádříme jakožto vztaženy na nanometr.

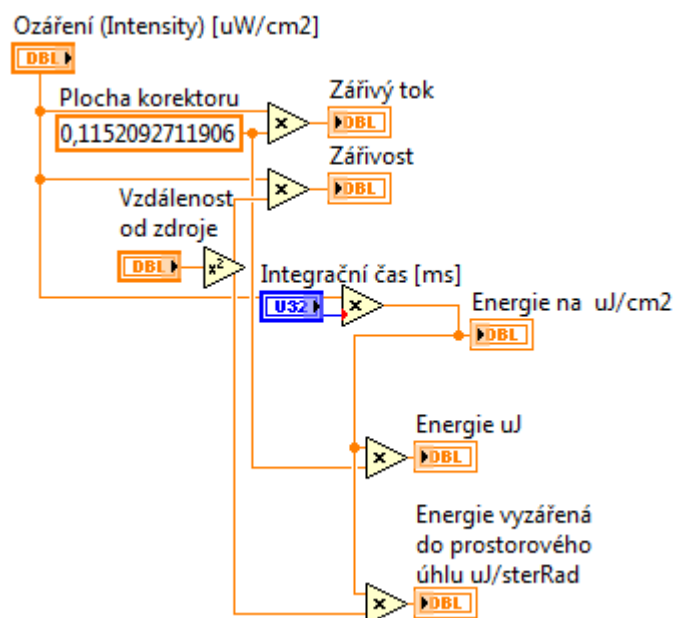
Tabulka 6: Analogie mezi radiometrickými a spektrálními veličinami [16]

Radiometrická veličina	Symbol	Spektrální veličina	Symbol
Zářivý tok [W]	Φ_e	Spektrální tok [$\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$]	Φ_λ
Zářivost [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$]	I_e	Spektrální zářivost [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$]	I_λ
Ozáření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_e	Spektrální ozáření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$]	E_λ

Vztah mezi zářivým a spektrálním tokem:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda d\lambda \quad (42)$$

Výkon [W] může být snadno převeden na **energii** [W·s = J, Joule], která byla zdrojem vyzářena nebo objektem přijata, a to vynásobením výkonu integračním časem [s].



Obrázek 40: Výpočet radiometrických veličin v LabVIEW - 1. část

Dále mezi radiometrické veličiny patří vyjádření počtu fotonů, které jsou přijaty povrchem čidla během jedné integrační doby [Mol], fotonů připadajících na jednotku plochy [m²] během jedné integrační doby [Mol · m⁻²], resp. fotonů přijatých povrchem čidla za sekundu [Mol · s⁻¹] a fotonů přijatých na jednotce plochy [m²] za sekundu [Mol · s⁻¹ · m⁻²]. Vzorový výpočet je uveden níže.

Energie fotonů:

$$E(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (43)$$

h...Planckova konstanta (h = 6,62606876 · 10⁻³⁴ J·s)

c...rychlost světla (c = 2,998 · 10⁸ m·s⁻¹)

λ...vlnová délka v metrech

Výpočet energie fotonů pro např. 250 nm:

$$E(250) = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{250 \cdot 10^{-9}} = 7,946 \cdot 10^{-19} \text{ Joule/foton} \quad (44)$$

1 eV = 1,60207 · 10⁻¹⁹ J, takže energie fotonů vyjádřena v eV/foton je:

$$E(250) = \frac{7,946 \cdot 10^{-19}}{1,60207 \cdot 10^{-19}} = 4,9592 \text{ eV/foton} \quad (45)$$

Pokud pro vlnovou délku 250 nm naměříme ozáření $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, platí:

$$E_e = 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2 = 20 \mu\text{Joule}/\text{s} \cdot \text{cm}^2 = 0,2 \text{ Joule}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \quad (46)$$

$$E_e = 0,2 \mu\text{Joule}/\text{s} \cdot \text{m}^2 = 0,2/(1,60207 \cdot 10^{-19}) \text{ eV}/\text{s} \cdot \text{m}^2 = 1,248 \cdot 10^{18} \text{ eV}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \quad (47)$$

Nyní již můžeme vypočítat počet fotonů/s/m²:

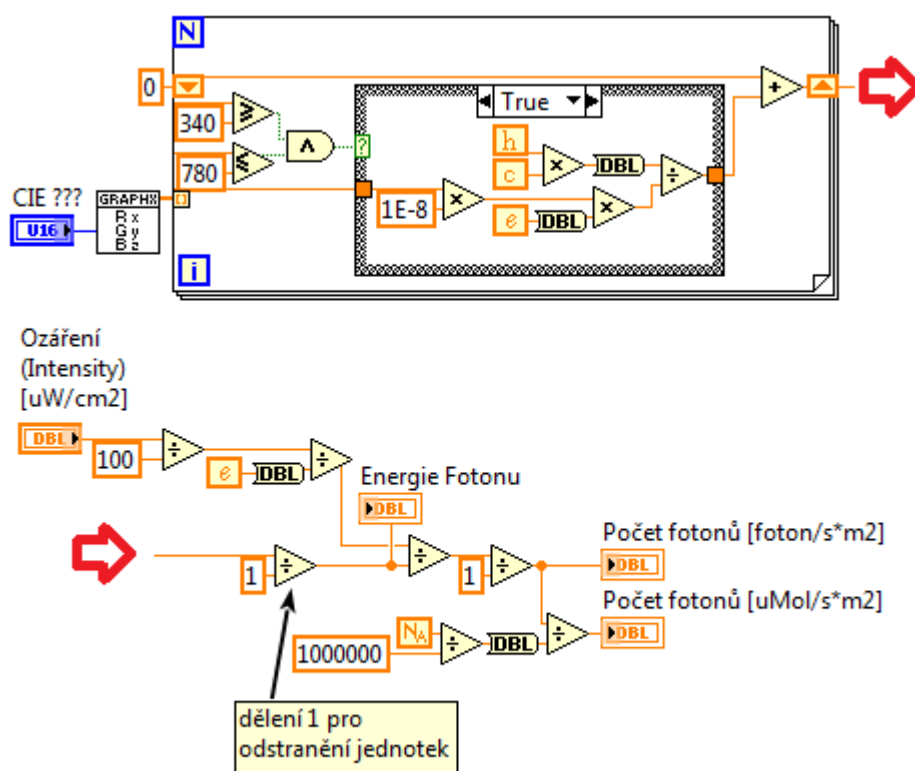
$$\frac{E_e}{E(250)} = \frac{1,248 \cdot 10^{18}}{4,9592} = 2,517 \cdot 10^{17} \frac{\text{Fotonů}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (48)$$

Přepočet na μmoly:

$$1 \text{ mol} = 6,02308 \cdot 10^{23} \text{ (Avogadrova konstanta)}$$

$$1 \mu\text{mol} = 6,02308 \cdot 10^{17}$$

$$\frac{2,517 \cdot 10^{17}}{6,02308 \cdot 10^{17}} = 0,418 \frac{\mu\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (49)$$

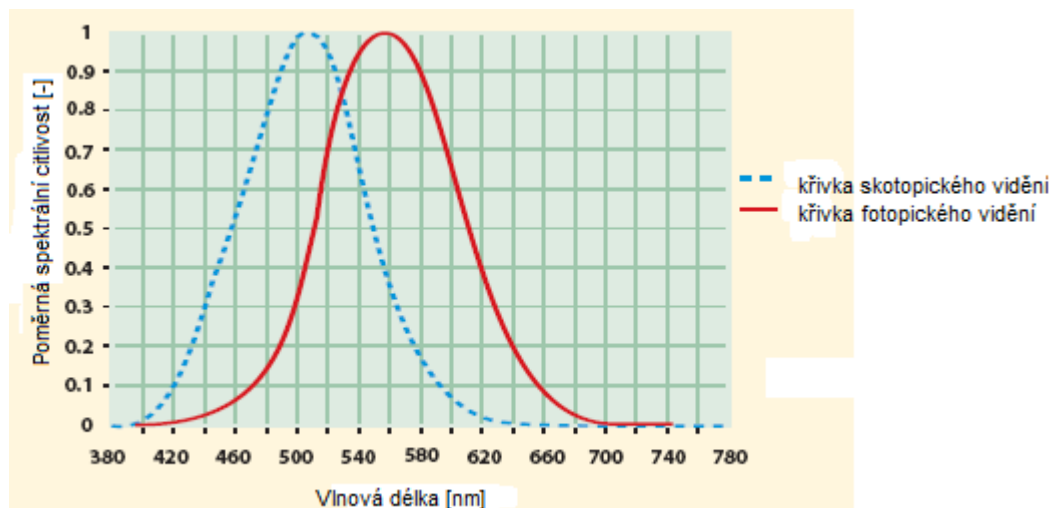


Obrázek 41: Výpočet radiometrických veličin v LabVIEW - 2. část

[6], [11], [15], [16]

5.6 Fotometrie

Fotometrie se zabývá měřením pouze viditelného spektra elektromagnetického vlnění. Na rozdíl od radiometrie je zde zohledněna i citlivost lidského oka na různé vlnové délky $V(\lambda)$, tudíž charakterizuje vjem, jaký světlo dopadající na sítnici vyvolá. Křivky poměrné spektrální citlivosti oka na jednotlivé vlnové délky se liší pro denní (fotopické, uplatňují se především čípky) a noční (skotopické, uplatňují se především tyčinky) vidění.



Obrázek 42: Poměrná spektrální citlivost lidského oka na jednotlivé vlnové délky, normováno na 1 (maximální amplituda odpovídající $\lambda = 555,2$ nm pro čípky) [Upraveno z 19]

Fotometrické veličiny bodového zdroje jsou analogické k radiometrickým. Ekvivalentem k zářivému toku Φ_e [W] je světelný tok Φ [Lumen = lm], k zářivosti I_e [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$] svítivost I [$\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} = \text{Kandela} = \text{cd}$] a k ozáření E_e [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] osvětlení E [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Lux} = \text{lx}$].

Kandela [cd] je zařazena mezi základní jednotky SI (zkratka z francouzského Le Système International d'Unités) soustavy. Původně byla definována jako svítivost jedné svíčky do prostoru, nyní jako svítivost monochromatického zdroje záření na frekvenci $540 \cdot 10^{14}$ Hz, vlnové délce 555,2 nm a zářivosti 1/683 W. Při převodu mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami je tedy zohledněna jednak poměrná spektrální citlivost oka $V(\lambda)$, a také koeficient K (pro tyčinky $K = 1740$, pro čípky $K = 683$).

Svítivost I [cd] lze vypočíst ze vztahu:

$$I = K \cdot \int_0^\infty I_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (50)$$

Pokud nemáme k dispozici spojitý, ale diskrétní průběh zářivosti, pak platí:

$$I = K \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta I_e(\lambda) \cdot \Delta V(\lambda) \quad (51)$$

Meze λ_1 a λ_2 se obvykle pohybují v intervalu 380 až 780 nm, protože právě v tomto rozsahu je definována křivka poměrné spektrální citlivosti $V(\lambda)$.

Díky těmto vztahům lze ověřit, proč se pro čípký světelná účinnost záření K rovná 683. Pokud do vztahu dosadíme parametry monochromatického zdroje definujícího Kandelu, získáme toto:

$$I = K \cdot I_e \cdot V(\lambda) \quad (52)$$

$$I = K \cdot I_e \cdot V(555,2) = K \cdot I_e \quad (53)$$

$$K = \frac{I}{I_e} \quad (54)$$

$$K = \frac{1 \text{ (cd)}}{\frac{1}{683} \text{ (W)}} = 683 \quad (55)$$

Světelný tok Φ [lm] získáme ze zářivého toku Φ_e [W] díky vztahu:

$$\Phi = K \cdot \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (56)$$

Respektive:

$$\Phi = K \cdot \sum_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Delta \Phi_e(\lambda) \cdot \Delta V(\lambda) \quad (57)$$

Pokud je zdroj světla izotropní (jeho svítivost I nezávisí na směru vyzařování), a září do prostorového úhlu Ω , platí rovněž vztah:

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (58)$$

Jednotkou je Lumen [lm], který odpovídá světelnému toku vyzářenému do prostorového úhlu izotropním zdrojem o svítivosti 1 cd.

Poslední fotometrickou veličinou je **osvětlení E [lx]**. Vyjadřuje světelný tok Φ dopadající na plochu S . Jednotkou je Lux [lx] vyjadřující osvětlení jednoho metru čtverečního světelným tokem 1 lm.

Platí:

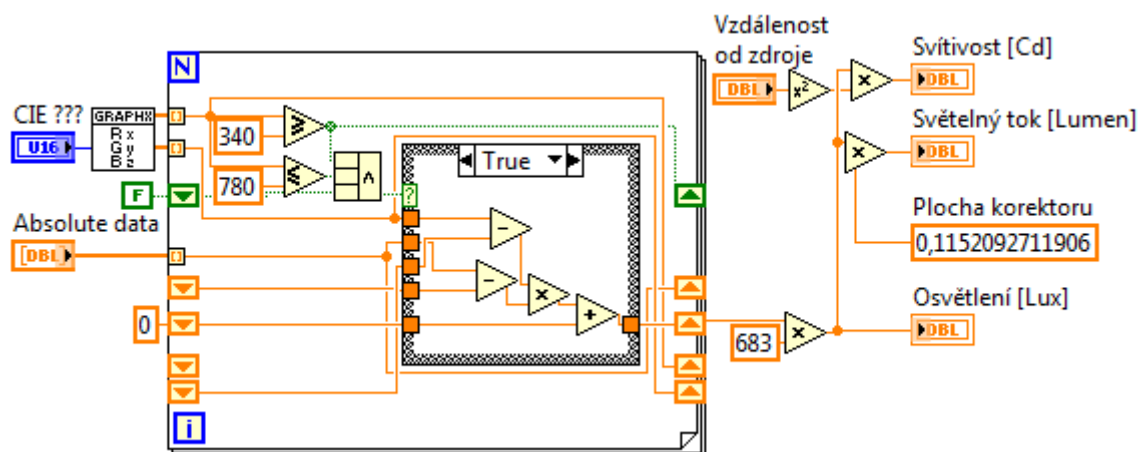
$$E = K \cdot \int_0^\infty E_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (59)$$

Popř.:

$$E = K \cdot \sum_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Delta E_e(\lambda) \cdot \Delta V(\lambda) \quad (60)$$

Také:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (61)$$



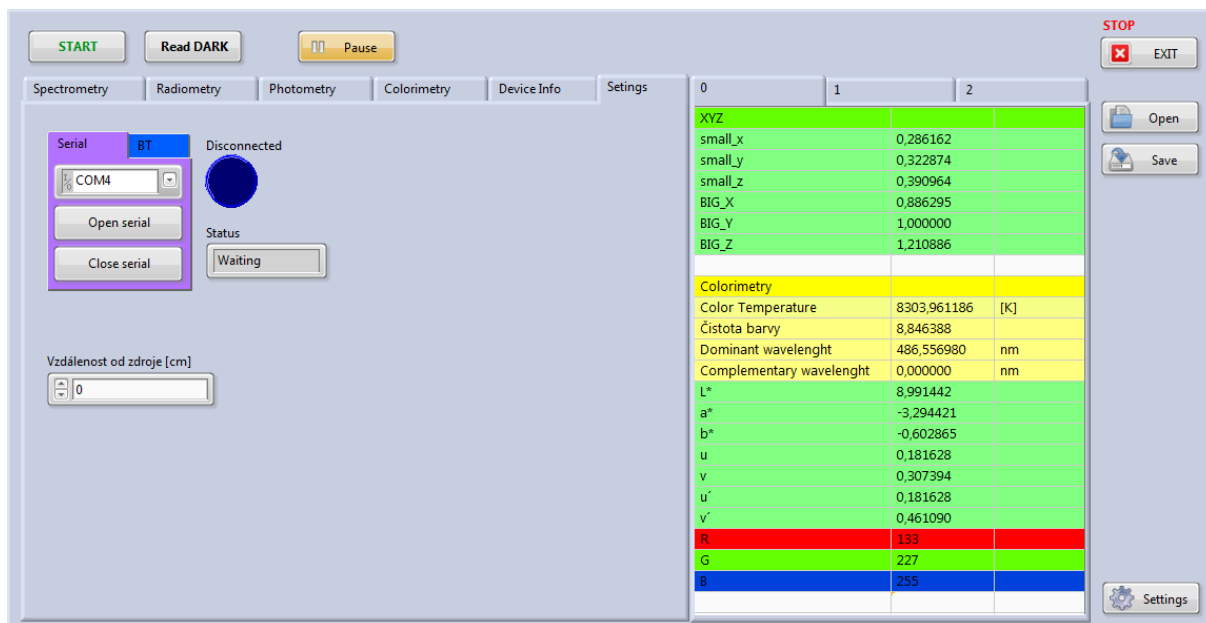
Obrázek 43: Výpočet fotometrických veličin v LabVIEW

[6], [11], [18]

5.7 Uživatelské rozhraní softwaru

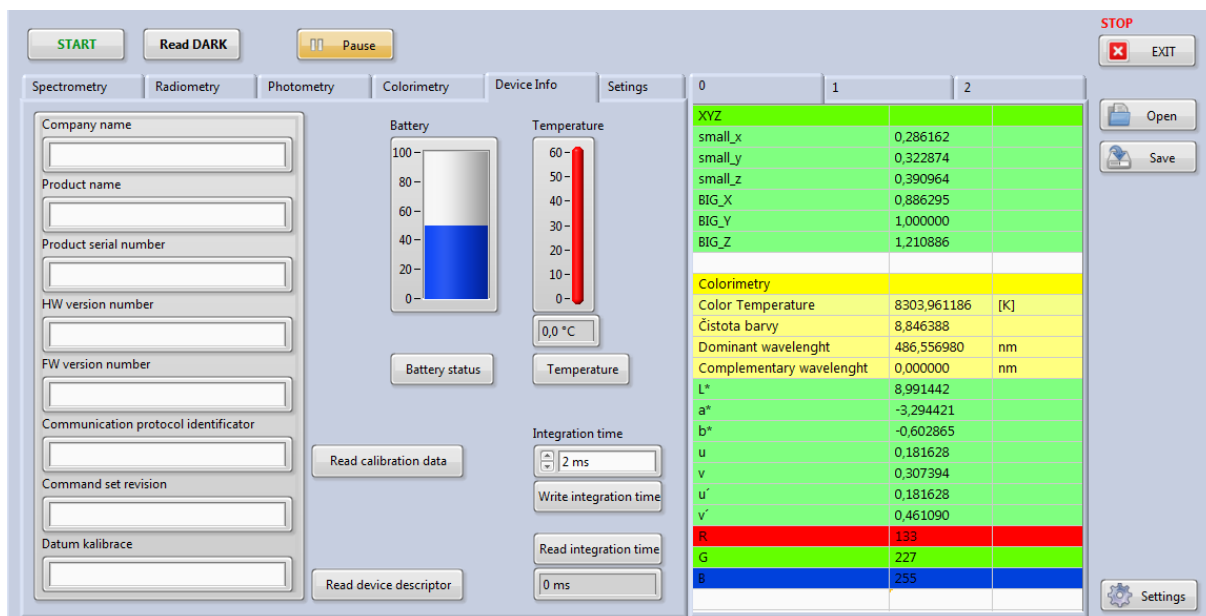
Postup měření z pohledu uživatele je následující.

Nejprve musí být navázáno spojení s Bluetooth. V záložce **Settings** (Obrázek 44) se vybere příslušný port a spojení se naváže po stisku tlačítka *Open serial*. V případě, že je komunikace navázána úspěšně, objeví se u indikátoru nápis *Connected* a status se změní na *Sending*. K ukončení dojde po kliku na tlačítko *Close serial*. Dále se na této záložce zadává vzdálenost mezi zdrojem záření a detektorem [cm].



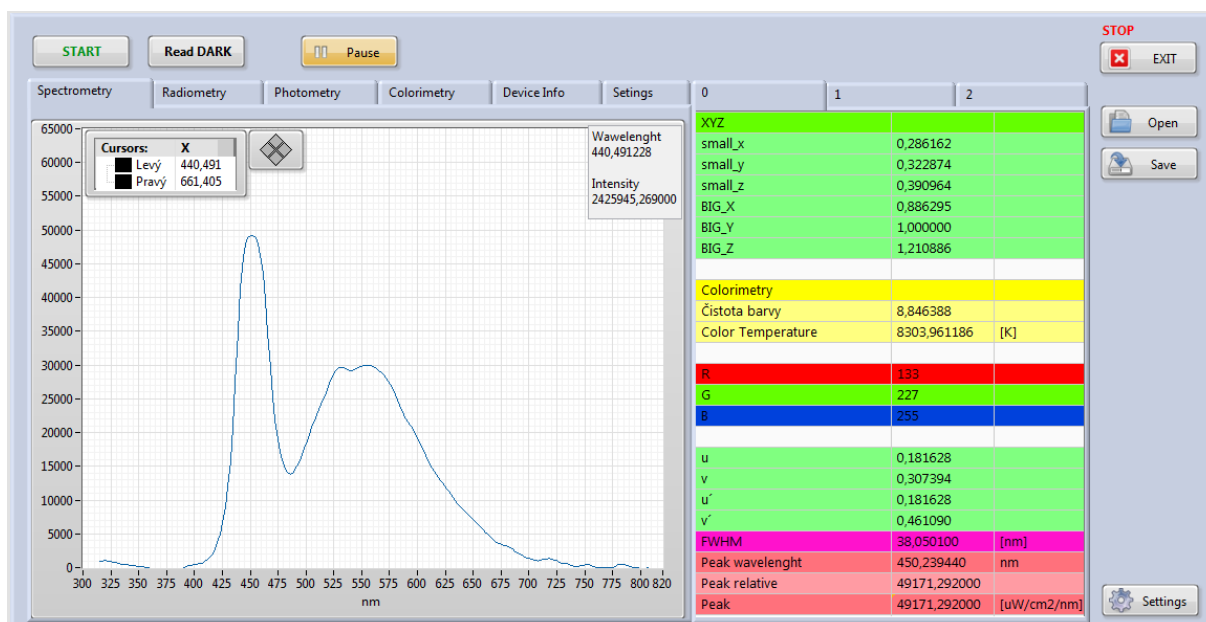
Obrázek 44: Ovládací software - okno pro nastavení komunikace

V záložce **Device info** (Obrázek 45) se musí před započítím měření nastavit integrační čas [ms], jeho zadání se potvrdí klikem na *Write integration time*. Po kliku na *Read calibration data* lze načíst kalibrační data se souboru. *Read device descriptor* zase umožňuje načtení přístrojové specifikace (značka, typ, sériové číslo, apod.). Dále je na této záložce indikován stav baterie a okolní teplota (přístroj lze používat pouze při stanovených provozních teplotách).



Obrázek 45: Ovládací software - okno s informacemi o zařízení

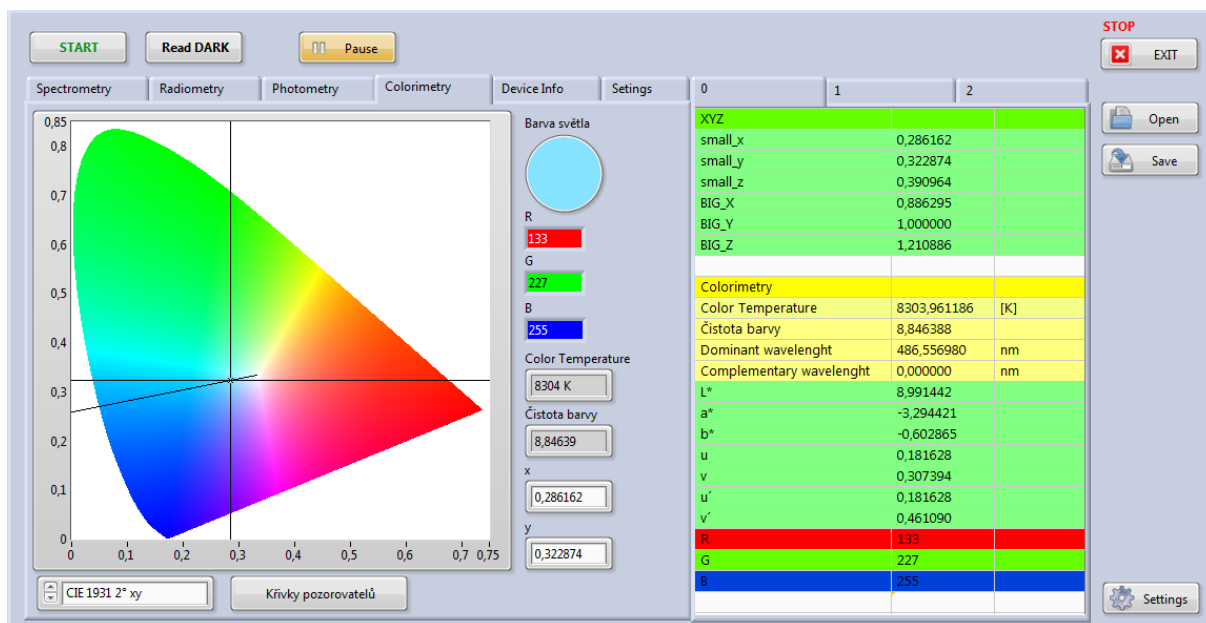
Samotné měření je započato po stisku tlačítka *Start*. Poté musí být změřena tma, a to tak, že se senzor zatemní, a stiskne se tlačítko *Read DARK*. Následně se senzor opět odtemní a je připraven k měření, jehož výsledky mohou být exportovány tlačítkem *Save* do formátu *.txt. Měření lze přerušit stiskem *Pause* nebo ukončit klikem na *Stop* (EXIT). V případě, že chce uživatel pouze načíst již dříve naměřená data ze soboru ve formátu *.txt, lze to provést tlačítkem *Open*. Ihned po startu se začne v záložce *Spectrometry* (Obrázek 46) vykreslovat spektrální křivka.



Obrázek 46: Ovládací software - okno pro spektrometrii

Panel programu pro radiometrii a fotometrii je stejný jako pro spektrometrii, proto zde není uveden. Uživatel pouze může po stisku tlačítka *Settings* (Obrázek 47 vpravo dole) nastavit, které z radiometrických a fotometrických veličin mají být indikovány v pravé části okna. Rovněž si může vybrat barvu podbarvení daného řádku, a tím zdůraznit požadované hodnoty.

V záložce **Colorimetry** (Obrázek 47) je pak vykreslen diagram chromatičnosti. Na základě vypočtených trichromatických souřadnic se v něm křížovým kurzorem vyznačí barva světla, které měřený zdroj emituje. Ta je pak ještě indikována vedle diagramu, spolu se souřadnicemi R, G, B, x, y, teplotou a čistotou barvy. Pod diagramem si lze v rozbalovacím menu vybrat typ standardního pozorovatele, a po kliku na *Křivky pozorovatelů* se objeví okno s grafy, zobrazujícími jejich průběh.

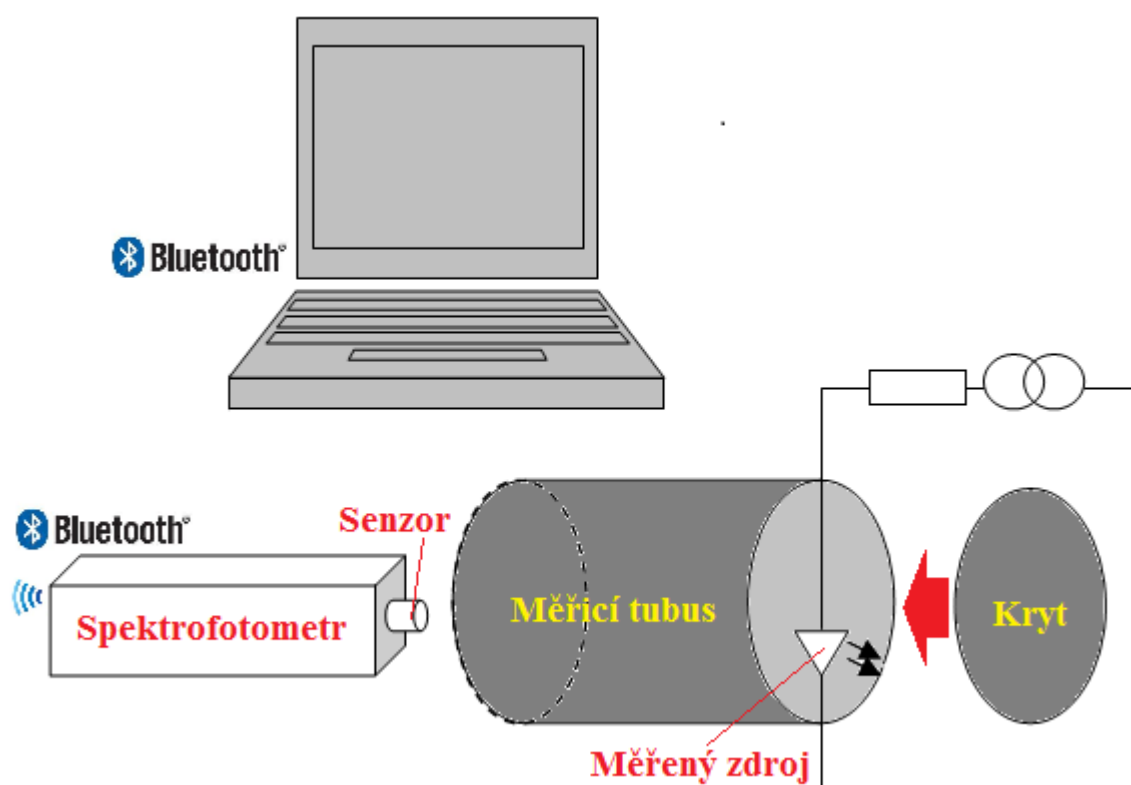


Obrázek 47: Ovládací software - okno pro kolorimetrii

6 Sestavení experimentálního měřicího pracoviště

Spektrofotometr je přístroj, jehož primární funkcí je schopnost změřit spektrální charakteristiku (tj. závislost intenzity záření na vlnové délce) měřeného zdroje. Následně mohou být programové na základě těchto charakteristik a zadaných vstupních parametrů, popř. konstant a tabulkových hodnot, dopočteny požadované spektrometrické, radiometrické, fotometrické a kolorimetrické veličiny.

Aby bylo samotné měření co nejpřesnější, mělo by být prováděno v prostředí, ve kterém je maximálně eliminováno okolní rušivé záření, tudíž v prostředí temném. To může být vytvořeno v komoře, tubusu nebo v integrační sféře. Ta navíc obsahuje řadu optických prvků, které fokusují rozptýlené svazky záření na čidlo.



Obrázek 48: Měřicí pracoviště pro stanovování spektrálních charakteristik LED světelných zdrojů

Sestavené měřicí pracoviště se skládá z ústředního komponentu – spektrofotometru. Dále z počítače, který ho ovládá, a zároveň bezdrátově prostřednictvím Bluetooth přijímá a dále zpracovává naměřená data. Pak z měřicího tubusu, jež je na jedné straně opatřen portem pro senzor, a na druhé odnímatelným krytem, pod který lze vložit měřený světelný zdroj. Zdrojem mohou být mimo jiné LED s předřazeným ochranným rezistorem, napájené proudovým zdrojem.

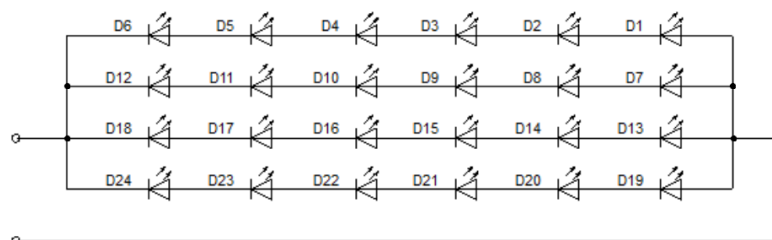
7 Testování měřicího přístroje

Přístroj byl otestován na sestaveném měřicím pracovišti, které je blíže popsáno v kapitole 6. Měření stejných světelných zdrojů bylo provedeno jednak vytvořeným spektrometrem EPDM, tak referenčním spektrometrem Avantes AvaSpec - 2048 - USB2 (parametry viz. tabulka 7).

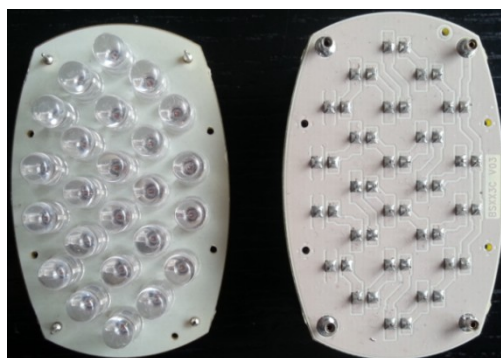
Tabulka 7: Technické údaje AvaSpec - 2048 - USB2 [52]

Parametr	Specifikace
Monochromátor	Czerny - Turner, ohnisková vzdálenost 75 mm
Rozsah vlnových délek	200 - 1100 nm
Rozlišení	0,04 - 20 nm, závisí na nastavení
Citlivost	16bitový ADC
Detektor	CCD lineární detektor, 2048 pixelů
A/D převodník	16 bitů, 2MHz
Integrační čas	1,1 ms - 1 min.
Rozhraní	USB 2.0, RS - 232
Napájení	Výchozí USB, 350 mA, nebo SPU2 externí 12 VDC, 350 mA
Mřížka	600 vrypů/mm
Rozměry, hmotnost	175 × 110 × 44 mm, 716 g

Jako světelné zdroje byly při testování použity čtyři zářiče (bílý, červený, modrý a zelený). Každý z nich se skládá ze 24 LED v sériově - paralelním zapojení.



Obrázek 49: Schéma sériově - paralelního zapojení zdrojů LED

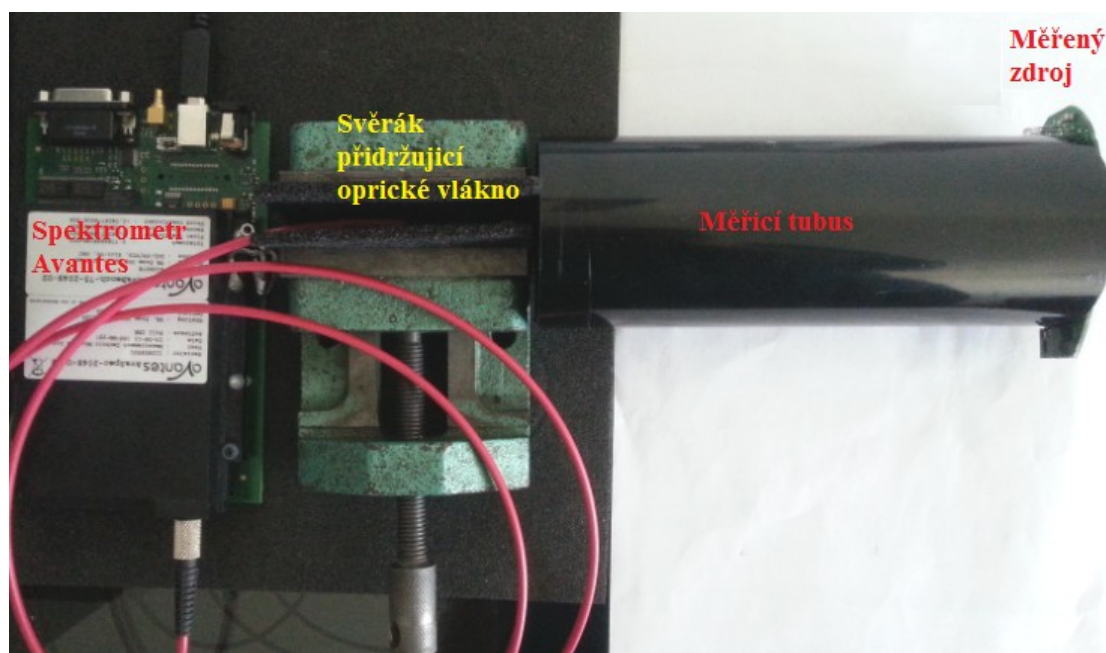


Obrázek 50: Měřený světelný zdroj LED

Dále byl při měření použit tubus délky 20 cm a průměru 7 cm.



Obrázek 51: Měření se spektrometrem EPEM



Obrázek 52: Měření se spektrometrem Avantes

V rámci závěrečného testování byla provedena pouze měření kolorimetrická. Radiometrické a fotometrické veličiny prozatím naměřit nelze, jelikož doposud nebyla vytvořena vhodná mechanická soustava, která zajistí dokonalou fokusaci optického svazku do vstupní štěrbiny spektrometrického senzoru. Prozatím je připraven pouze teoretický návrh soustavy. Měla by se skládat z kosinového korektoru a bikonvexní čočky. Kosinový korektor zajistí, že na čočku budou paprsky dopadat rovnoběžně, a ta je poté fokusuje do jednoho ohniska, ve kterém bude ležet právě vstupní štěrbina spektrometru.

8 Zhodnocení dosažených výsledků

Hodnoty získané při experimentálním měření jsou zaznamenány v tabulkách níže. Naměřené spektrální křivky byly vyexportovány ve formátu *.txt, a jsou součástí CD přílohy. Náhledy z měření jsou v příloze číslo II.

Tabulka 8: Výsledky měření pro bílý LED zdroj

Měřená veličina	Spektrometr EPEM	Spektrometr Avantes	Absolutní chyba	Relativní chyba [%]
x	0,286162	0,301	0,014838	4,929568
y	0,322874	0,316	0,006874	2,175316
z	0,390964	0,383	0,007964	2,079373
X	0,886295	0,8772	0,009095	1,036822
Y	1	0,919	0,081	8,813928
Z	1,210886	1,1146	0,096286	8,638615
Peak [nm]	450,23944	454,1	3,86056	0,850156
Dominantní vlnová délka [nm]	486,55698	484,276	2,28098	0,471008
Čistota barvy [%]	8,846388	12,24	3,393612	
Teplota barvy [K]	7303,9612	7331,3	27,3388	0,372905
u	0,181628	0,195	0,013372	6,857436
v	0,307394	0,306	0,001394	0,455556

Tabulka 9: Výsledky měření pro červený LED zdroj

Měřená veličina	Spektrometr EPEM	Spektrometr Avantes	Absolutní chyba	Relativní chyba [%]
x	0,666889	0,698	0,031111	4,457163
y	0,31842	0,299	0,01942	6,494983
z	0,014691	0,003	0,011691	389,7
X	2,094367	7,975	5,880633	73,73834
Y	1	3,42	2,42	70,76023
Z	0,046139	0,031	0,015139	48,83548
Peak [nm]	632,264362	635,27	3,005638	0,473128
Dominantní vlnová délka [nm]	619,397452	625,151	5,753548	0,920345
Čistota barvy [%]	96,035352	99,21	3,174648	
Teplota barvy [K]	U monochromatických zdrojů se neurčuje.			
u	0,486136	0,537	0,050864	9,471881
v	0,348174	0,346	0,002174	0,628324

Tabulka 10: Výsledky měření pro modrý LED zdroj

Měřená veličina	Spektrometr EPEM	Spektrometr Avantes	Absolutní chyba	Relativní chyba [%]
x	0,129294	0,129	0,000294	0,227907
y	0,069404	0,079	0,009596	12,14684
z	0,801302	0,792	0,009302	1,174495
X	1,862916	1,701	0,161916	9,518871
Y	1	1,045	0,045	4,30622
Z	11,545448	10,489	1,056448	10,07196
Peak [nm]	465,872748	468,54	2,667252	0,569269
Dominantní vlnová délka [nm]	463,849137	471,876	8,026863	1,701053
Čistota barvy [%]	92,525333	95,57	3,044667	
Teplota barvy [K]	U monochromatických zdrojů se neurčuje.			
u	0,144695	0,139	0,005695	4,097122
v	0,116507	0,128	0,011493	8,978906

Tabulka 11: Výsledky měření pro zelený LED zdroj

Měřená veličina	Spektrometr EPEM	Spektrometr Avantes	Absolutní chyba	Relativní chyba [%]
x	0,201553	0,19	0,011553	6,080526
y	0,665933	0,727	0,061067	8,399862
z	0,132514	0,083	0,049514	59,65542
X	0,302662	0,2633	0,039362	14,94949
Y	1	1,0094	0,0094	0,931246
Z	0,19899	0,1155	0,08349	72,28571
Peak [nm]	524,474991	522,52	1,954991	0,374147
Dominantní vlnová délka [nm]	524,354173	531,016	6,661827	1,254544
Čistota barvy [%]	72,848626	84,18	11,33137	
Teplota barvy [K]	U monochromatických zdrojů se neurčuje.			
u	0,076143	0,067	0,009143	13,64627
v	0,377367	0,385	0,007633	1,982597

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty jednotlivých veličin naměřených spektrometrem EPEM a spektrometrem Avantes AvaSpec - 2048 - USB2, který byl využit k získání hodnot referenčních, jež jsou považovány za správné a vztažné.

Absolutní chyba byla počítána podle vztahu:

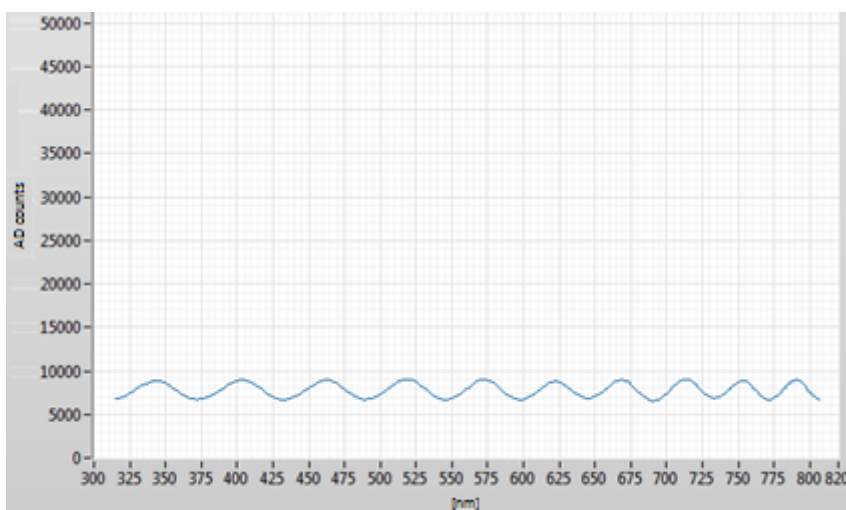
$$\text{Absolutní chyba} = |\text{Veličina naměřena Avantesem} - \text{Veličina naměřena EPEMem}| \quad (62)$$

Relativní chyba:

$$\text{Relativní chyba [\%]} = \left(\frac{\text{Absolutní chyba}}{\text{Veličina naměřena Avantesem}} \right) \cdot 100 \quad (63)$$

Za směrodatnou je považována chyba relativní. Ta by v ideálním případě měla být u prototypu menší než 10 %. Ne vždy ovšem bylo takového výsledku dosaženo. Vysvětlení je následující.

Při testování bylo zjištěno, že měření je nepříznivě ovlivněno rušením, způsobeným impulsně regulovaným zvyšujícím zdrojem napětí 5 V (Step – up convertor). Tento zdroj je řízen jednak pulsně šířkovou modulací (PWM), tak pulsně frekvenční modulací (PFM). U PFM dochází ke změnám frekvence, a právě tyto změny způsobují rušení signálu. Vzhledem k tomu, že rušení o proměnných frekvencích nelze odfiltrovat, bude se muset přistoupit k jinému řešení, a to k volbě jiného typu zdroje, který disponuje pouze PWM. Rušení je zachyceno na obrázku 62.



Obrázek 53: Rušení způsobené zdrojem napětí

Rovněž by mělo být přihlédnuto k tomu, že referenční spektrometr Avantes AvaSpec - 2048 - USB2 je přístroj vybavený detektorem s 2048 pixely, kdežto vytvořený spektrometr má pouze 256 pixelů. Rozlišení je tedy podstatně nižší, což se muselo ve výsledních měření nutně projevit. Také je sám o sobě zatížen určitou nepřesností a měření chybou.

Hodnoty, které mají v kolorimetrii nejvyšší důležitost, jsou v tabulkách 8 až 11 zvýrazněny kurzívou. U nich nastala pouze v jednom případě situace, kdy byla relativní chyba větší než 10 %. Celkově bylo dosaženo odchylky nižší, než je stanovená mez, v 77,8 % případů. Po odladění chyb přístroje bude provedeno nové testování s očekávanou maximální relativní chybou 2 %.

Celkově lze ale provedené testovací měření prohlásit za úspěšné, i přes zjištěný nedostatek.

9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést teoretickou analýzu neonatologické fototerapie, zaměřenou na využívané zdroje záření a metody jejich validace. Dále vytvoření koncepčního návrhu spektrofotometrického přístroje, jeho zkompletování z vhodně zvolených komponent a naprogramování ovládacího a výpočetního software v LabVIEW. Na závěr sestavení pracoviště pro otestování a ověření funkčnosti prototypu.

Neonatologická fototerapie je založena na využívání zejména modrého světla k léčbě novorozenecké žloutenky (hyperbilirubinémie). Tu způsobuje nadměrné množství bilirubinu v krvi. Vzhledem k tomu, že bilirubin působí na nervové buňky toxicky, může u nedonošených novorozenců zapříčinit trvalé poškození mozku. Léčba je proto nezbytná.

Co se týče fototerapeutických zdrojů záření, nejčastěji jsou jimi stojanové lampy. Zářiče emitující světlo je pak potřeba pravidelně kontrolovat, a to pokud možno univerzálním přístrojem se širokým spektrem měřených vlnových délek, s co nejmenšími rozměry a bezdrátovým připojením k počítači. Všechny tyto požadavky vyvinutý přístroj splňuje.

Ústřední součástí vytvořeného spektrofotometru EPEM je jeho senzor. Vybrán byl typ Hamamatsu Mini Spectrometer C10988MA-01 s lineárním 256pixelovým detektorem a měřicím rozsahem od 340 do 750 nm. Signál je následně digitalizován 16bitovým A/D převodníkem ADS8860. Komunikaci s počítačem, čtení stavu baterie a řízení nabíjení zajišťuje mikrokontroler Freescale Kinetis MK64FN1M0VLL12 s jádrem ARM Cortex-M4 120 MHz. Dále je přístroj vybaven Bluetooth modulem Panasonic PAN1026 Series pro bezdrátový přenos dat s rychlostí 3Mb/s. Synchronizace hodinovým taktem mezi jednotlivými komponenty je zajištěna komplexním programovatelným logickým obvodem XILINX XC2C64 Cool runner. Napájecím zdrojem je akumulátor Li-Ion.

Hlavním úkolem bylo ovšem naprogramování ovládacího a výpočetního software v prostředí LabVIEW. Program zabezpečuje navázání spojení mezi počítačem a Bluetooth modulem přístroje. Přenesená data jsou následně zpracována tak, že posloupnost pixelů je převedena na posloupnost vlnových délek, a jim příslušící amplitudy spektrálních čar jsou po kalibraci převedeny na intenzitu. Křivka naměřeného spektra je vyobrazena v grafu. Dále jsou ze spektrálního průběhu, a dalších zadaných vstupních hodnot, dopočteny požadované spektrometrické, radiometrické, fotometrické a kolorimetrické veličiny. Navíc je v diagramu chromatičnosti vyznačena barva měřeného světla.

Celá práce byla završena provedením experimentálního měření na sestaveném pracovišti. K testování byly zvoleny čtyři LED světelné zdroje, které byly proměřeny vytvořeným spektrofotometrem EPEM a referenčním Avantes AvaSpec – 2048. Získané hodnoty byly následně mezi sebou porovnány a vyhodnoceny. Ve 22,2 % případů byly vzájemné odchylky kolorimetrických veličin větší než stanovená mez. Na základě tohoto faktu bylo zjištěno, že je senzor nepříznivě ovlivňován rušením generovaným napěťovým zdrojem, který bude potřeba vyměnit za jiný. Celkově lze ale provedené testovací měření prohlásit za úspěšné, i přes zjištěnou chybu, která bude v nejbližší době napravena. Odchylky mohly být dále způsobeny tím, že spektrofotometr Avantes je sám o sobě vybaven detektorem s 2048 pixely, kdežto EPEM disponuje pouze 256 pixely. Rozlišení je tedy podstatně nižší, což se muselo ve výsledcích rovněž nutně odrazit.

Hlavní předností nového přístroje, oproti konkurenčním výrobkům, je jeho miniaturizace a snížení pořizovacích nákladů na polovinu.

Závěrem lze tedy konstatovat, že všechny body zadání diplomové práce byly úspěšně splněny. Vytvořený spektrofotometr, včetně ovládacího a výpočetního programu, je funkční a připraven k dalšímu rozvoji, a po dalším testování jej bude možno užívat v praxi.

10 Literatura

- [1] DORT, J.; TOBRMANOVÁ, H. *Hyperbilirubinémie novorozence*
Dostupné z <http://www.neonatologie.cz/fileadmin/user_upload/080519/definit-hyperbilirubinemie.pdf>
- [2] HANUŠČÁKOVÁ, P. *Novorozenecká žloutenka - ikterus*
Dostupné z <<http://zdravi.e15.cz/clanek/sestra/novorozenecka-zloutenka-ikterus-429784>>
- [3] RASOCHOVÁ, J. *Fyziologie novorozenecké žloutenky*. Brno – Masarykova univerzita. Lékařská fakulta. 2010. Vedoucí práce: MUDr. Zuzana Nováková, Ph.D.
- [4] DORT, J.; DORTOVÁ, E.; JEHLIČKA, P. *Neonatologie*. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-2462-253-8.
- [5] DOSOUDILOVÁ, L. *Simulace slunečního záření*. Brno - Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. 2009. 50 s. Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Zdeněk Navrátil, Ph. D.
- [6] VEČERA, F. *Měření světelné účinnosti zdrojů světla*. Brno - Masarykova univerzita. Fakulta přírodovědecká. 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr.
- [7] *Návod k použití - AVASPEC*. Nizozemsko: Avantes B.V., 2010.
- [8] HABEL, J.; DVOŘÁČEK, K.; DVOŘÁČEK, V.; ŽÁK, P. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public s r.o., 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [9] DUDKOVÁ, L. *Matematické metody sledování kvality barevného tisku*. Olomouc - Univerzita Palackého. Fakulta přírodovědecká. 2010. 72 s. Vedoucí diplomové práce: RNDr. Tomáš Furst, Ph.D.
- [10] ZMEŠKAL, O.; ČEPPAN, M.; DZIK, P. *Barevné prostory a správa barev* [online], 2002 [cit. 2014 - 11 - 15].
Dostupné z <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06_rozn02.pdf>
- [11] SVOBODOVÁ, B. *Návrh experimentálního měřicího pracoviště pro fototerapii*. Ostrava - Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2013. 63 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Penhaker, Ph.D.
- [12] *Encyklopedie fyziky – Základy kolorimetrie* [online], [cit. 2014 - 11 - 17].
Dostupné z <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/542-zaklady-kolorimetrie>>
- [13] MEYER, M. *Deconstructing chromacity* [online], 2010 [cit. 2014 - 11 - 17].
Dostupné z <<http://www.photo-mark.com/notes/2010/sep/08/deconstructing-chromaticity/>>
- [14] *Encyklopedie fyziky – Barva světla a barva tělesa* [online], [cit. 2015 - 1 - 10].
Dostupné z <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/544-barva-svetla-a-barva-telesa>>
- [15] *Návod k použití - AVSIRRAD-DLL*. Nizozemsko: Avantes B.V., 2009.

- [16] ARECCHI, A. *Labsphere – A Halma Company: Seminar on Radiometry, Photometry, Diffuse reflecting materials, Integrating spheres*. [online], 2012 [cit. 2014 - 11 - 19].
Dostupné z <<http://www.labsphere.com/uploads/ArecchiOct2012.pdf>>
- [17] *Dominant wavelenght* [online], [cit. 2015 - 01 - 13].
Dostupné z <http://www.labcognition.com/onlinehelp/en/dominant_wavelength.htm>
- [18] ZAJÍC, J. *Základy fyziky I* [online], 2005 [cit. 2014 - 11 - 19].
Dostupné z <http://kf.upce.cz/dfjp/physics_1/lecture/uvod_ZF1_05a.pdf>
- [19] *Photometry* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25119>>
- [20] QUIMBY, R. S. *Appendix A - Solid Angle and the Brightness Theorem* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.globalspec.com/reference/21462/160210/appendix-a-solid-angle-and-the-brightness-theorem>>
- [21] *CIE 1931 Chromacity Diagram* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-04%20Chromaticity%20diagram.jpg>>
- [22] *Color models* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://groups.csail.mit.edu/graphics/classes/6.837/F98/Lecture4/Color.html>>
- [23] *CREE - LED Color Mixing: Basics and Background* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <www.cree.com/xlamp_app_notes/color_mixing>
- [24] *Viditelné spektrum pro člověka* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.flukeatelier.cz/wp-content/uploads/2013/05/spektrum.jpg>>
- [25] *Hamamatsu Mini - Spectrometer C10988MA datasheet*. Japonsko: Hamamatsu.
- [26] *Hamamatsu Mini-spectrometer C11351 Instruction manual*. Japonsko: Hamamatsu.
- [27] *Fototerapeutická Lampa FTL-600* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.tse.cz/zdravotni-technika/ftl-600.html>>
- [28] *Fototerapeutická LED Lampa LiLLY* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.tse.cz/zdravotni-technika/lilly.html>>
- [29] *Lightex phototherapy pad for treatment of neonatal jaundice* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <http://www.textileworld.com/Issues/2013/March-April/Nonwovens-Technical_Textiles/French_Technical_Textiles_Industry-Futurotextiles_3-Nexus_Of_Technology_And_Art>
- [30] *Department of neonatology: Lamp for intensive phototherapy* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.maichindom.com/en/clinics/view/9/>>
- [31] *Emission spectra of phototherapy light sources* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <http://www.nature.com/pr/journal/v44/n5/fig_tab/pr1998537f2.html#figure-title>

- [32] *Irradiance Spectra through air* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.cedar.wales.nhs.uk/sitesplus/documents/1091/00092%20Datex-Ohmeda%20Spot%20Phototherapy%20Lamp.pdf>>
- [33] *Irradiance Spectrum for a Draeger Heraeus Phototherapy Unit* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <<http://www.cedar.wales.nhs.uk/sitesplus/documents/1091/391%20Neonatal%20Phototherapy%20Review.pdf>>
- [34] BHUTANI, K. V.; Committee on Fetus and Newborn. Phototherapy to Prevent Severe Neonatal Hyperbilirubinemia in the Newborn Infant 35 or More Weeks of Gestation. *American Academy of Pediatrics: PEDIATRICS* [online]. 2011 [cit. 2015 - 1 - 18]. ISSN: 1098-4275.
Dostupné z <<http://pediatrics.aappublications.org/content/128/4/e1046.full.pdf+html>>
- [35] VREMAN, H. J.; WONG, R. J.; STEVENSON, D. K. Phototherapy: Current Methods and Future Directions. *Stanford University School of Medicine: Seminars of Perinatology* [online]. 5/2004 [cit. 2015 - 1 - 18].
Dostupné z <[http://www.seminperinat.com/article/S0146-0005\(04\)00071-0/abstract](http://www.seminperinat.com/article/S0146-0005(04)00071-0/abstract)>
- [36] MATHESIUS, V. *Léčba hyperbilirubinémie novorozenců modrým světlem*. Praha: Avicenum, 1979. 160 s.
- [37] EBBESEN, F.; AGATI, G.; PRATESI, R. Phototherapy with turquoise versus blue light. *Archives of disease in childhood: Fetal and neonatal edition* [online]. 5/2003 [cit. 2015 - 1 - 18].
Dostupné z <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1721595/pdf/v088p0F430.pdf>>
- [38] FROHN, M.; OBERTHÜR, W. a kol. *Elektronika - Polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [39] *Image Sensor Architectures for Digital Cinematography* [online]. Dalsa corp. [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <http://www.dalsa.com/dc/documents/Image_Sensor_Architecture_Whitepaper_Digital_Cinema_00218-00_03-70.pdf>
- [40] *CPLD a FPGA 1.díl - popis obvodů* [online], [cit. 2015 - 1 - 19].
Dostupné z <http://pandatron.cz/?481&cpld_a_fpga_1.dil_-_predstaveni_obvodu>
- [41] *XC2C64 CoolRunner-II CPLD - Advance Product Specification*. Xilinx, 2002.
- [42] SHIEH, J.-Y.; WANG, L. K.; CHIU, M.-L. A High Color Rendering Index on Multichip LED Light Source. *Circuits and Systems* [online]. 1/2012 [cit. 2015 - 3 - 16].
Dostupné z <http://sparc.nfu.edu.tw/~reed/paper/J5_CS20120100014_32727506.pdf>
- [43] *Chroma Meter CL-200A* [online], [cit. 2015 - 3 - 16].
Dostupné z <<http://www.centasiathai.com/centasiathai.com/en/product/chroma-meter-cl-200a.html>>
- [44] VÍK, M. *Základy měření barevnosti 1. díl*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1995. ISBN 80-7083-162-6.

- [45] *Modelling colour* [online], [cit. 2015 - 3 - 22].
Dostupné z <<http://www.jiscdigitalmedia.ac.uk/infokit/colour-management/modelling-colour>>
- [46] JUDD, D.; YONEMURA, G. CIE 1960 UCS Diagram and the Müller Theory of Color Vision. *Journal of research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry* [online]. 1/1969 [cit. 2015 - 3 - 22].
Dostupné z <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/74A/jresv74An1p23_A1b.pdf>
- [47] *How to select optimal resolution?* [online], [cit. 2015 - 3 - 29].
Dostupné z <<http://www.avantes.ru/en/spectrometer/resolution/>>
- [48] *RGB/XYZ Matrices* [online], [cit. 2015 - 3 - 29].
Dostupné z <<http://www.bruceindbloom.com/>>
- [49] *Freescale Kinetis K64F Sub-Family Data Sheet*[online].Freescale Semiconductor, Inc., 2014[cit. 2015 - 4 - 12].
Dostupné z <http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/K64P144M120SF5.pdf>
- [50] *Bluetooth Smart Ready (Multi Mode): PAN1026 Series*[online], [cit. 2015 - 4 - 12].
Dostupné z <<http://na.industrial.panasonic.com/products/wireless-connectivity/bluetooth/bluetooth-smart-ready-multi-mode/series/pan1026-series/CS487>>
- [51] *Development Kit for PAN1026 USB Dongle*[online], [cit. 2015 - 4 - 12].
Dostupné z <http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/panasonic_pan1026_desdes_guide_v_1.1._11.17.14.14>
- [52] *Katalog VII -Spectrometers Avantes*, 2012.
Dříve dostupné z <www.avantes.com>

11 Seznam příloh

Příloha I – Fotodokumentace prototypu

- **Obrázek 1:** Deska spektrometru EPEM I.
- **Obrázek 2:** Deska spektrometru EPEM II.

Příloha II – Výsledky testovacího měření

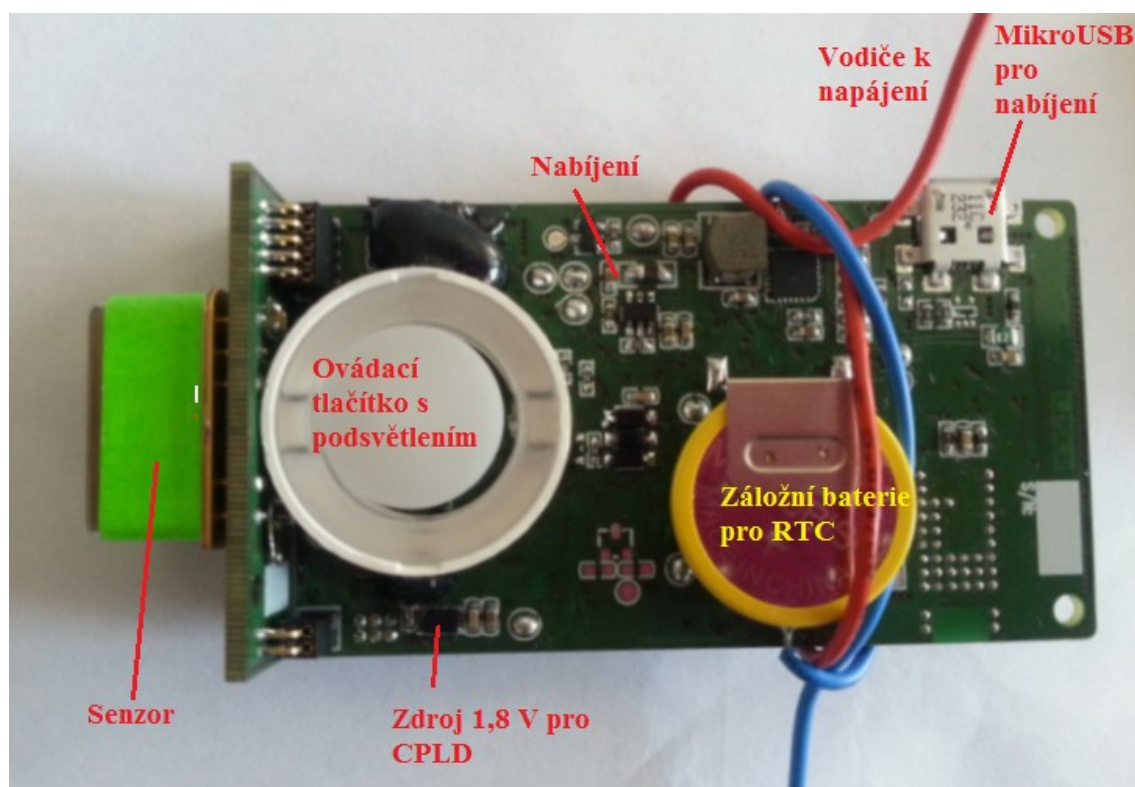
- **Obrázek 3:** Měření provedené spektrometrem EPEM – bílý LED zdroj
- **Obrázek 4:** Měření provedené spektrometrem Avantes – bílý LED zdroj
- **Obrázek 5:** Měření provedené spektrometrem EPEM – červený LED zdroj
- **Obrázek 6:** Měření provedené spektrometrem Avantes – červený LED zdroj
- **Obrázek 7:** Měření provedené spektrometrem EPEM – modrý LED zdroj
- **Obrázek 8:** Měření provedené spektrometrem Avantes – modrý LED zdroj
- **Obrázek 9:** Měření provedené spektrometrem EPEM – zelený LED zdroj
- **Obrázek 10:** Měření provedené spektrometrem Avantes – zelený LED zdroj

Příloha III – Schémata zapojení

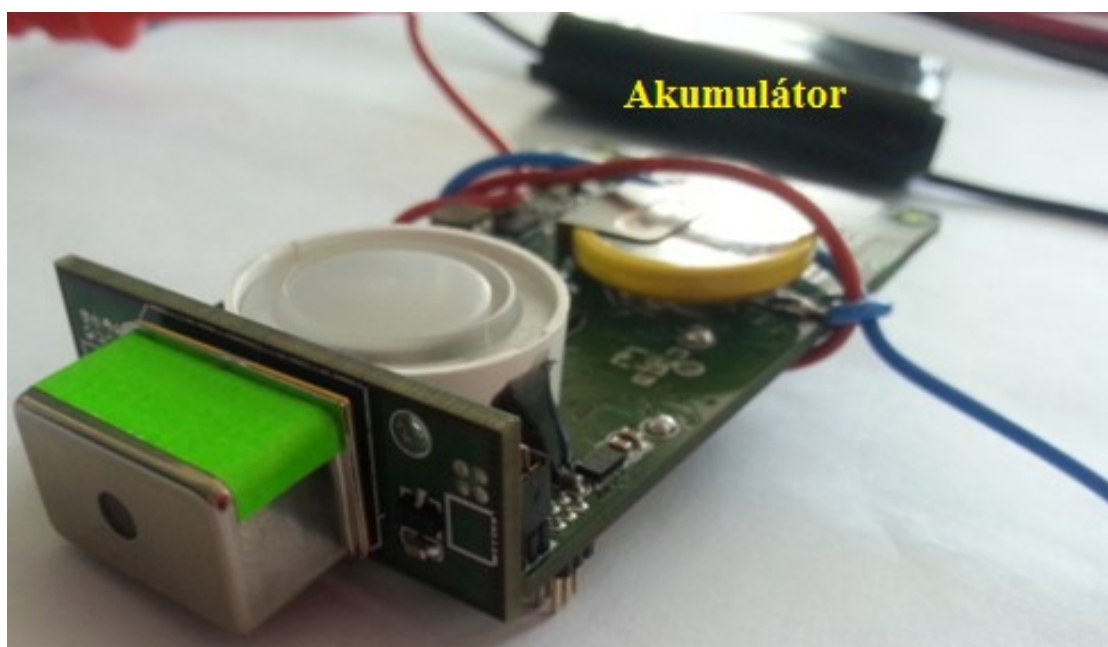
Příloha IV – CD Diplomová práce

- Diplomová práce ve formátu PDF
- Ovládací software pro spektrometr EPEM
- Spektrální křivky naměřené při testování

Příloha I – Fotodokumentace prototypu



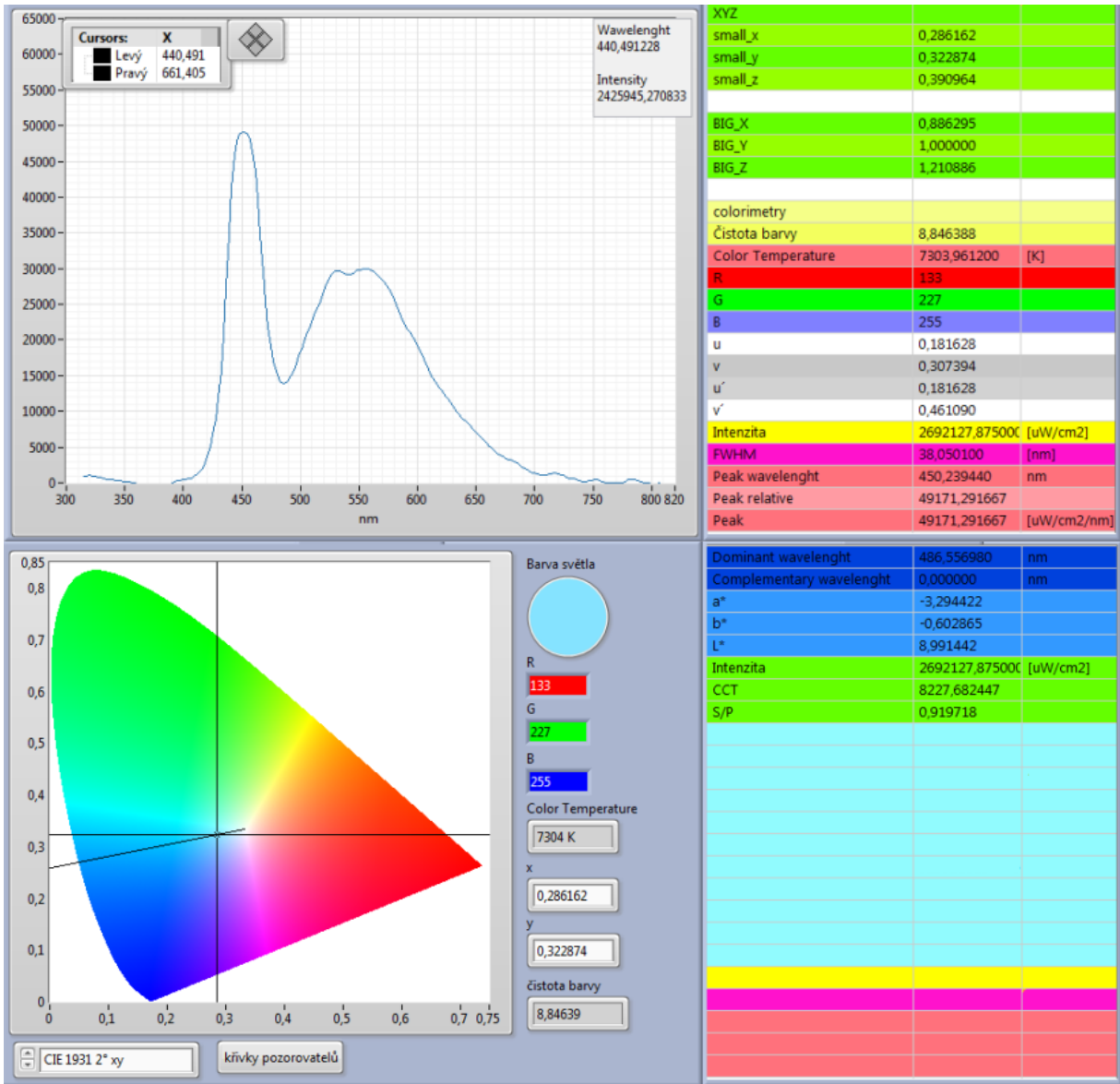
Obrázek 1: Deska spektrometru EPEM I.



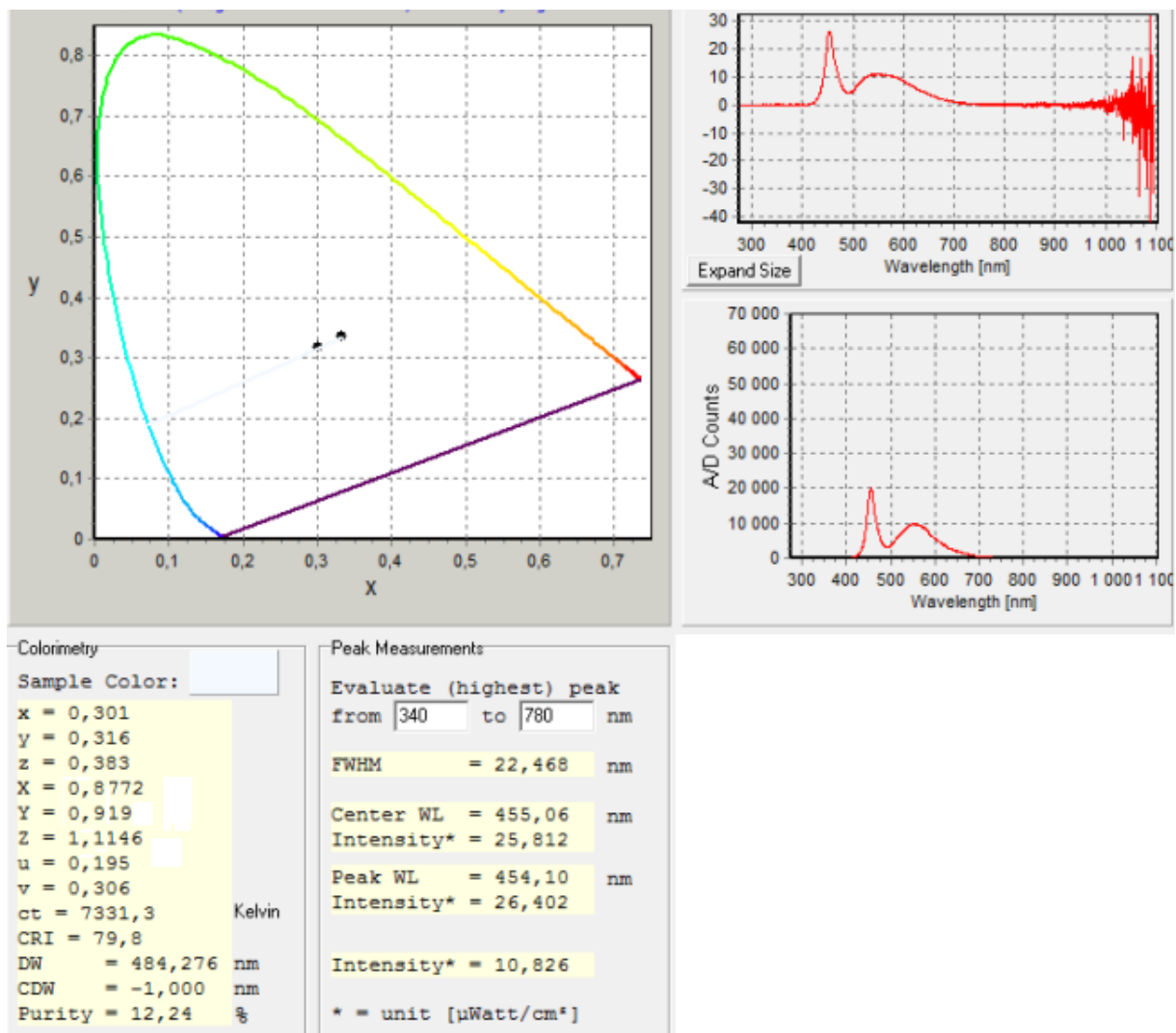
Obrázek 2: Deska spektrometru EPEM II.

Příloha II – Výsledky testovacího měření

Bílý LED zdroj

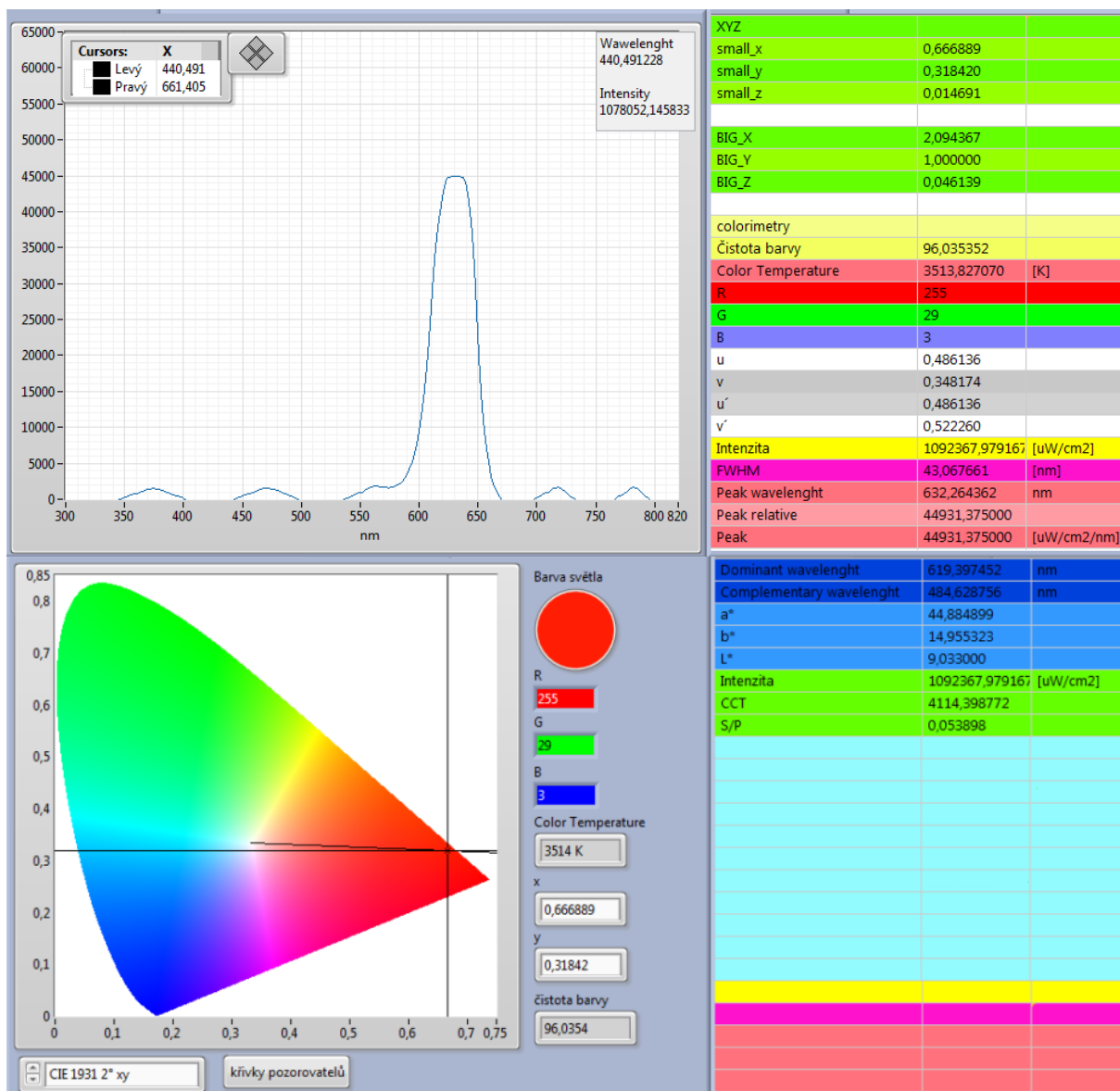


Obrázek 3: Měření provedené spektrometrem EPEM – bílý LED zdroj

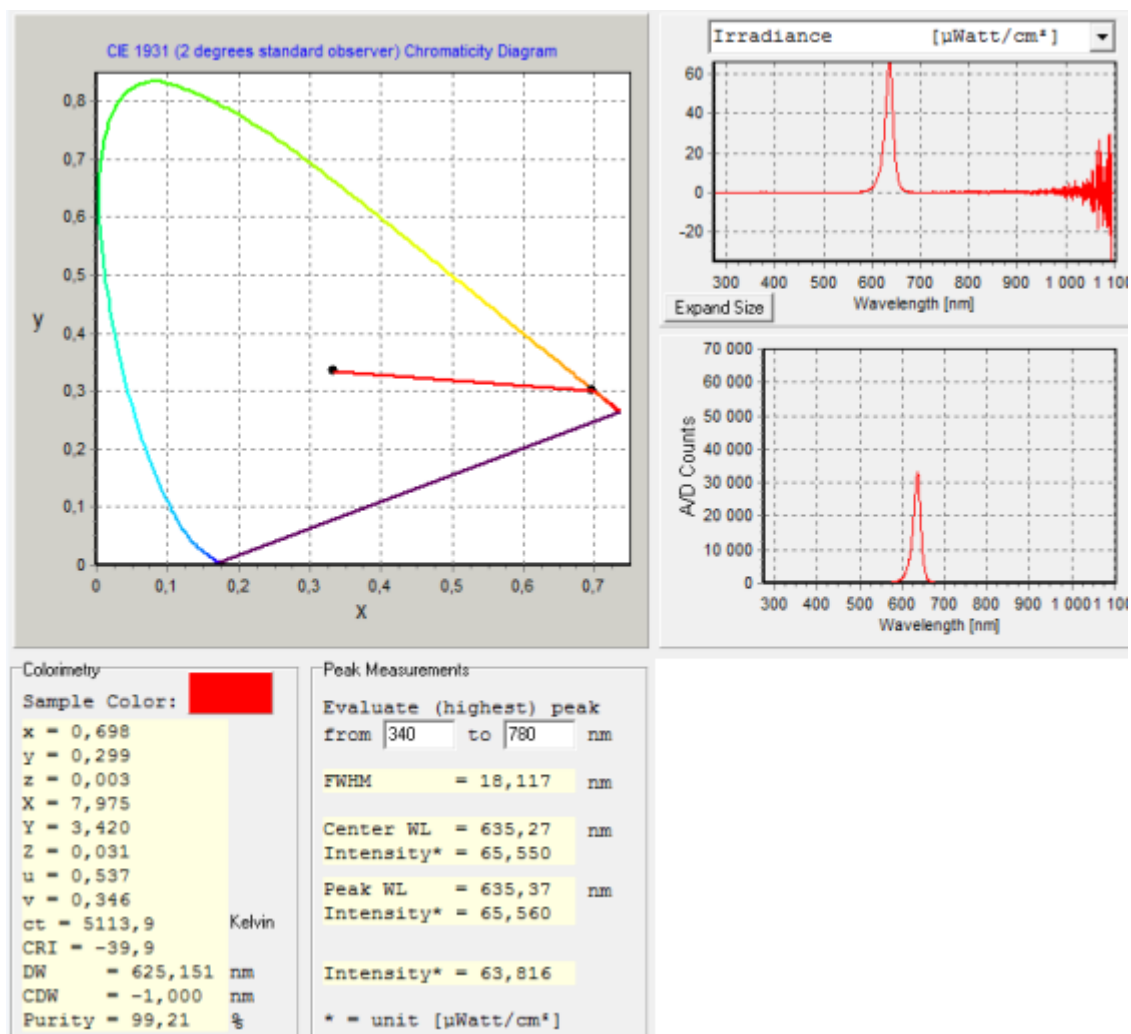


Obrázek 4: Měření provedené spektrometrem Avantes – bílý LED zdroj

Červený LED zdroj

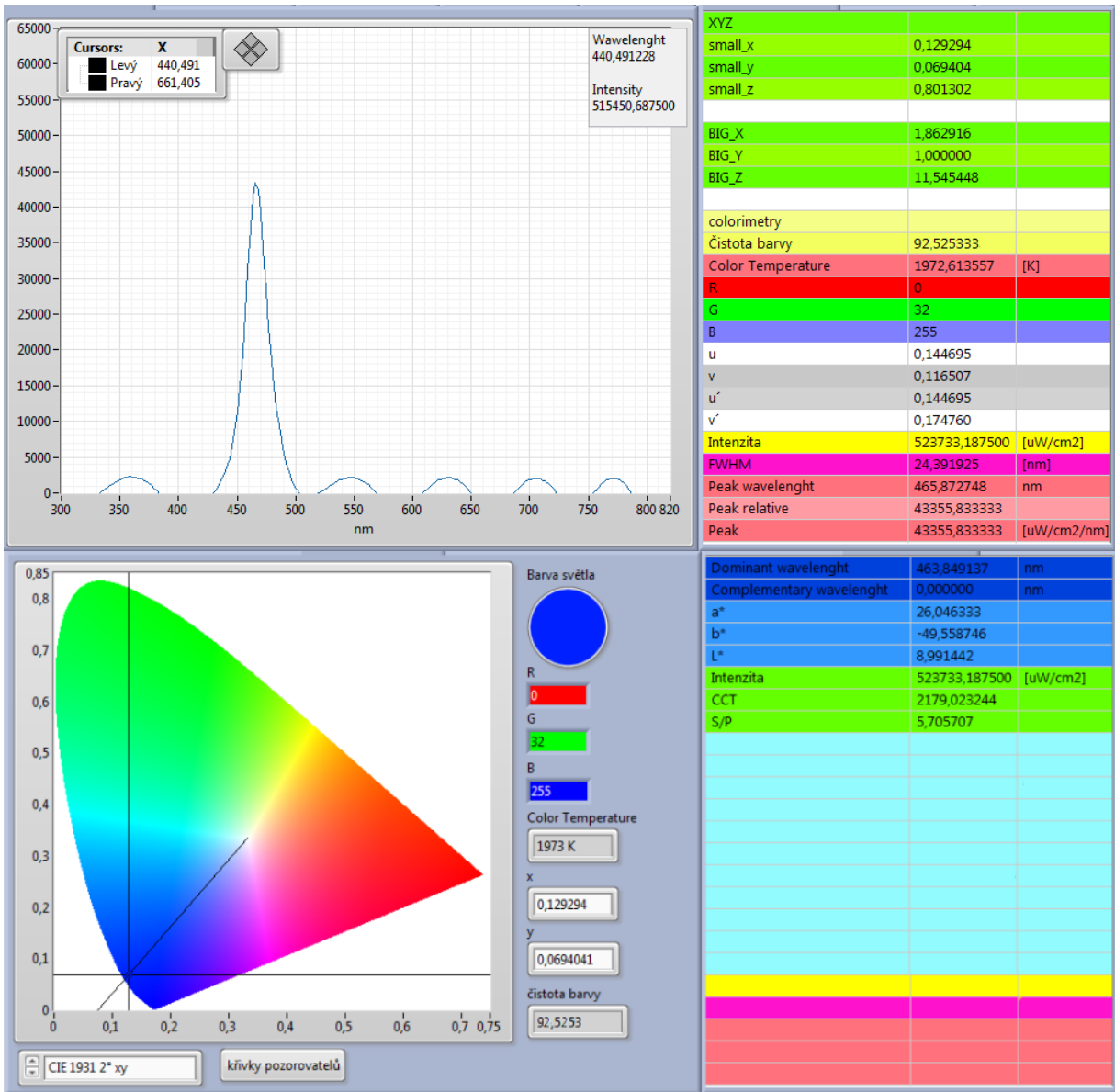


Obrázek 5: Měření provedené spektrometrem EPEM – červený LED zdroj

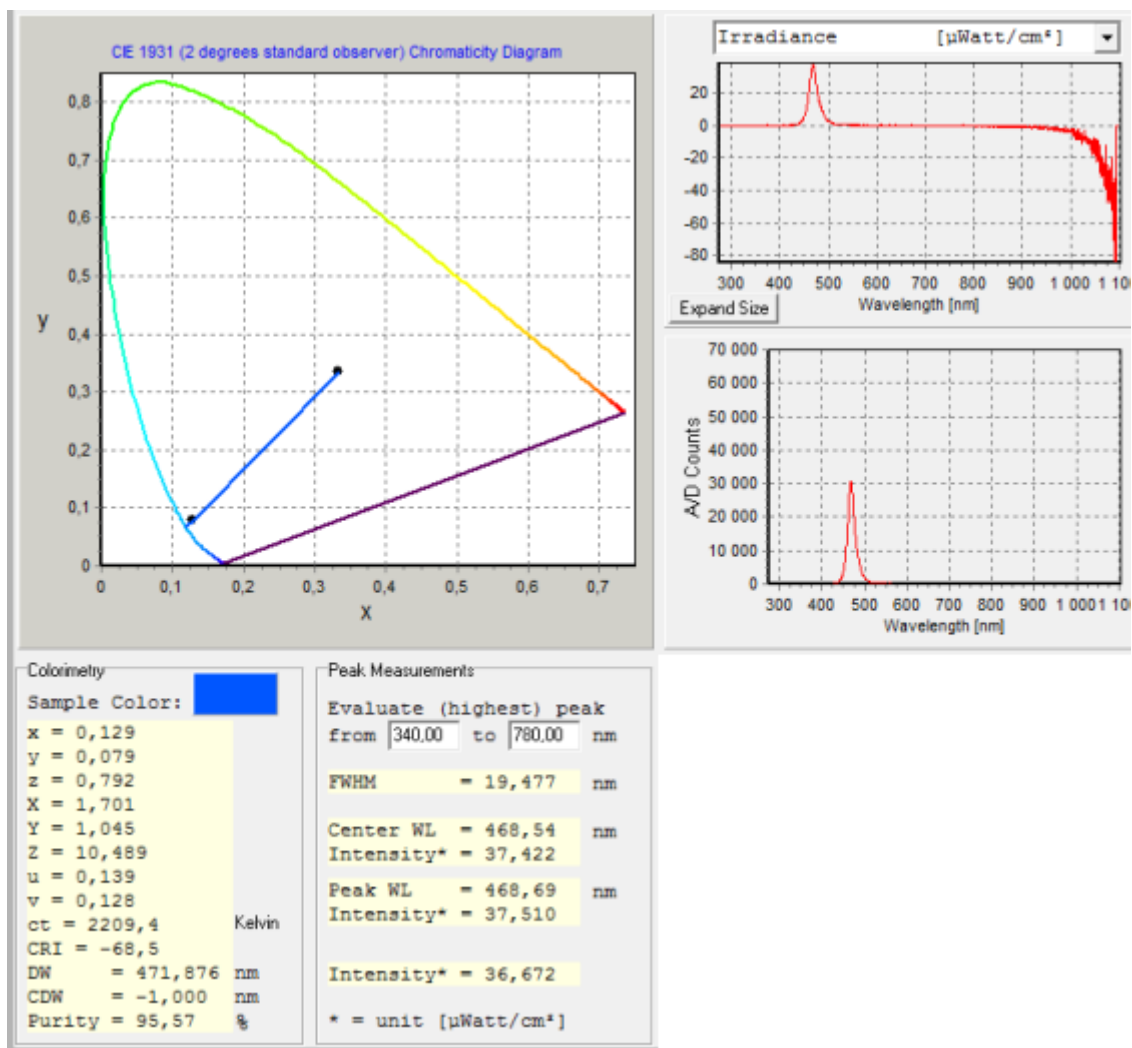


Obrázek 6: Měření provedené spektrometrem Avantes – červený LED zdroj

Modrý LED zdroj

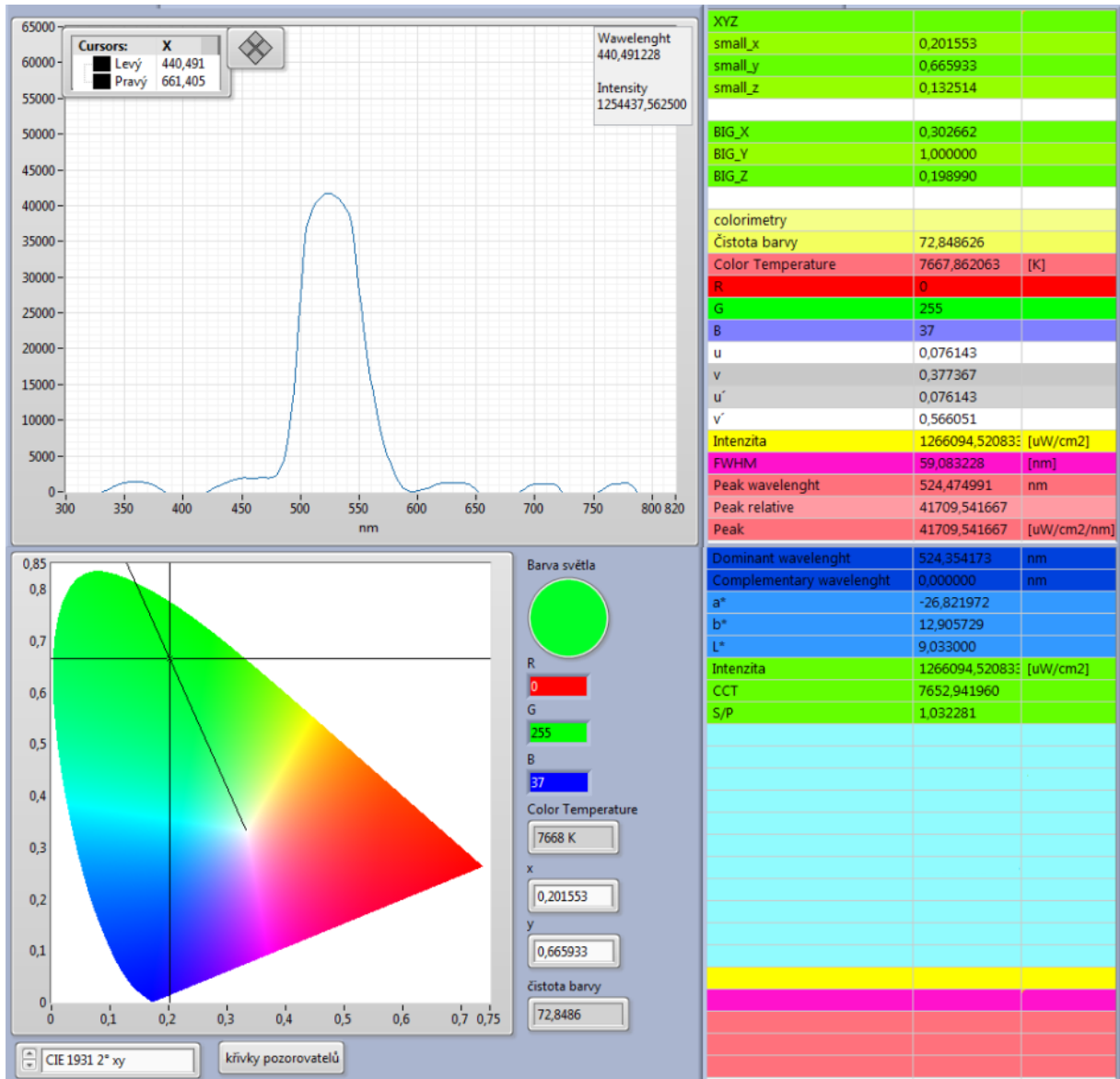


Obrázek 7: Měření provedené spektrometrem EPEM – modrý LED zdroj

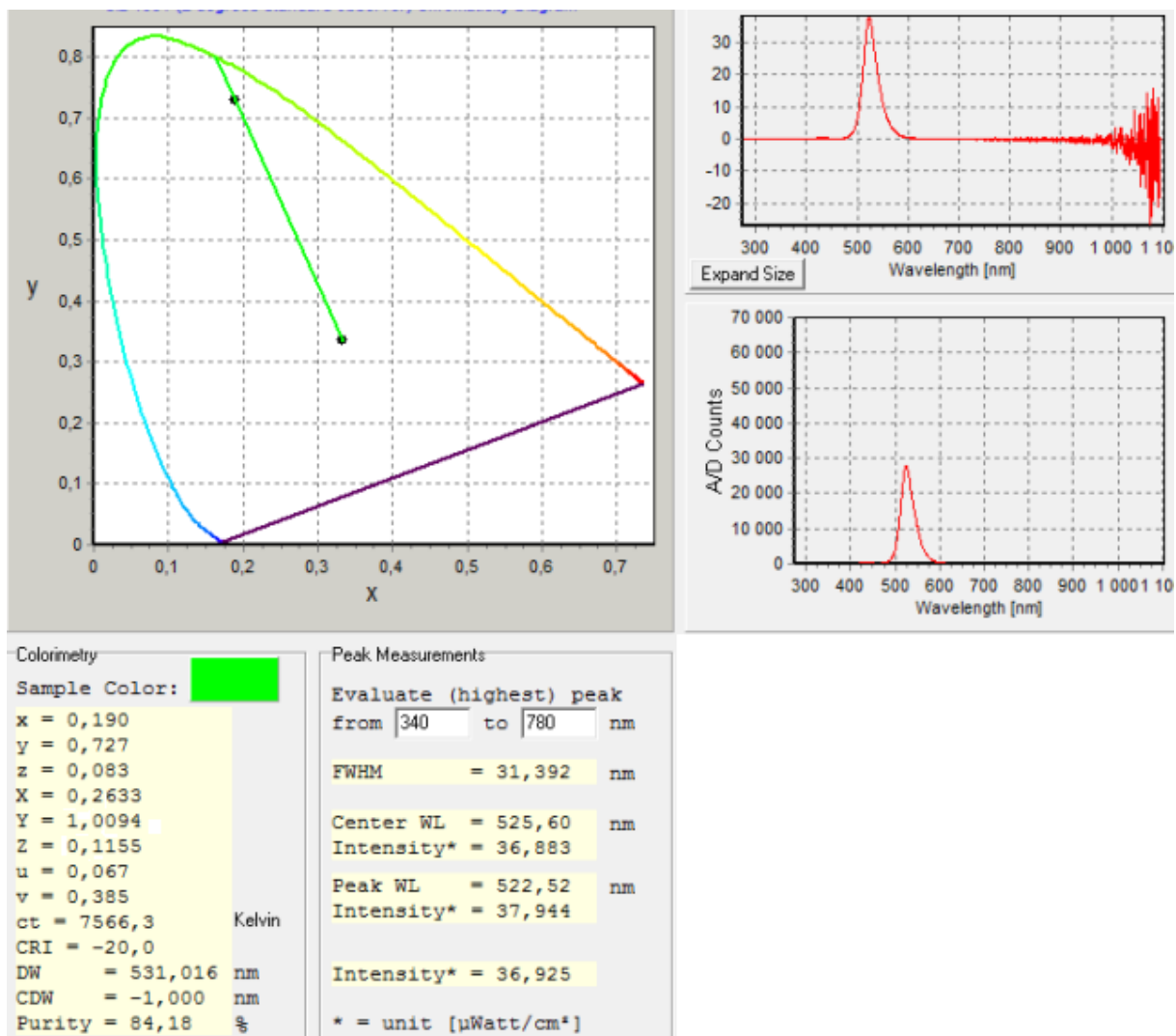


Obrázek 8: Měření provedené spektrometrem Avantes – modrý LED zdroj

Zelený LED zdroj



Obrázek 9: Měření provedené spektrometrem EPES – zelený LED zdroj



Obrázek 10: Měření provedené spektrometrem Avantes – zelený LED zdroj

Příloha III – Schémata zapojení

NEVEŘEJNÁ ČÁST PRÁCE